

POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica



Tesi di Laurea Magistrale

**Le dilatazioni termiche nei giunti ibridi
acciaio-alluminio in ambito automotive:
analisi sperimentale**

Relatore

Prof. Giovanni BELINGARDI

Prof. Alessandro SCATTINA

Candidato

Irene RICUPERO

Tutor aziendale

Ing. Fiorenza DI SCIULLO

Anno accademico 2021 - 2022

Sommario

Nel corso degli anni il settore automobilistico ha subito importanti cambiamenti legati alla progettazione e ai materiali utilizzati per la produzione dei veicoli. Le motivazioni che stanno alla base di questo cambiamento riguardano, in primo luogo, la richiesta di mercato e le normative in vigore. In particolare, il consumatore richiede un veicolo con consumi ridotti, mentre le normative prevedono una maggiore sicurezza dei passeggeri e delle ridotte emissioni, di inquinanti e di CO_2 .

Dal punto di vista delle emissioni, i limiti normativi sono, negli anni, sempre più restrittivi. Il limite sull'emissione di CO_2 , imposto dalla Commissione Europea, è di 95 g/km in vigore fino al 2020. I successivi *target* saranno ulteriormente ridotti a seguito dell'introduzione del nuovo ciclo omologativo WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles), in sostituzione dell'attuale ciclo NEDC (New European Driving Cycle). Si assisterà ad una riduzione del 20 % entro il 2025 fino al 45% entro il 2030.

Per raggiungere alcuni degli obiettivi sopra citati, ovvero la riduzione dei consumi in ottica cliente e delle emissioni, i costruttori di automobili puntano alla realizzazione di veicoli sempre più leggeri. Infatti, una riduzione in peso del 10% comporta un miglioramento in termini di consumi del 6 – 8% [1]. Realizzare un veicolo più leggero ha un impatto anche dal punto di vista delle emissioni di CO_2 , infatti, come ha affermato Piyada Charoensirisomboon, vicepresidente Innovation Campus Asia Pacific di BASF, una riduzione in peso di 100 kg permette di ridurre le emissioni di CO_2 di 10 g/km. Invece, la maggiore sicurezza dei passeggeri e le migliori prestazioni del veicolo si pongono da ostacolo all'obiettivo dei costruttori di ridurre il peso della struttura.

L'industria automobilistica, quindi, ricerca nuovi materiali, sempre più leggeri e performanti, al fine di ridurre le emissioni e i costi, aumentare la sicurezza dei passeggeri e ottenere prestazioni rilevanti. Contestualmente, si adottano nuove tecniche di giunzione, al fine di garantire un prezzo competitivo del veicolo finale.

I nuovi materiali che si possono adottare sono acciai ad alta resistenza, leghe di alluminio, leghe di magnesio e materiali compositi in fibra di carbonio.

Per quanto riguarda le nuove tecnologie si parla di *giunzioni ibride*, già presenti da diversi anni nelle automobili di maggiori prestazioni. Con il termine giunzioni ibride si identifica la combinazione delle tecniche di giunzioni tradizionali, come saldatura o rivettatura, con le tecniche di incollaggio adesive, in modo da sfruttare i vantaggi di entrambe le tecnologie.

Nello specifico, risulta molto interessante la combinazione tra adesivi e rivetti (*rivet-bonding*) in quanto consente l'unione di materiali dissimili, plastici, compositi, acciaio alto resistenziali e leghe di alluminio, garantendo migliori caratteristiche di resistenza a corrosione, fatica e impatto.

In questo studio di tesi è stato investigato proprio il comportamento delle giunzioni ibride *rivet-bonding*, in giunti costituiti da acciaio DP1000 e leghe di alluminio serie 6000, quando sottoposte ad un gradiente di temperatura. In particolare, queste condizioni vogliono simulare la fase di cottura cataforesi che si ha nel processo di produzione di un veicolo. Durante la cottura cataforesi si raggiungono temperature superiori ai 160 °C, di conseguenza, i materiali subiscono delle dilatazioni termiche che, se non sono opportunamente controllate dall'azione dell'adesivo, provocano il fessonamento dei giunti.

L'analisi condotta consiste in un insieme di prove che permettono la valutazione della resistenza al distacco per taglio dell'adesivo e della dilatazione termica differenziata.

La prima tipologia di prove permette di valutare la resistenza al taglio dell'adesivo. Si tratta di una prova di trazione, conforme allo standard aziendale, in provini realizzati preliminarmente. L'obiettivo di tale prova è valutare la compatibilità dell'adesivo con i carichi di esercizio e con i materiali adoperati. Affinché un adesivo sia ritenuto idoneo alla realizzazione delle giunzioni con i materiali testati, a tensione di rottura deve essere superiore ai 12 N/mm^2 , come previsto dalla normativa aziendale. Le prove sperimentali sono state svolte al variare della tipologia di adesivo, della temperatura di trazione e delle condizioni di invecchiamento dei provini.

La seconda tipologia di prove, invece, permette la valutazione delle dilatazioni termiche nell'intero giunto ibrido. Consiste in una serie di misurazioni, effettuate prima e dopo la cottura dei provini. I campioni sono stati realizzati con la sovrapposizione di tre profilati in alluminio e acciaio, di spessore 1.3-1.6 mm e 1.2 mm. È stato analizzato il comportamento del giunto sia con un adesivo specifico per i giunti ibridi, sia con un adesivo per i giunti in alluminio e anche con un adesivo specifico per l'acciaio.

I risultati che si vogliono ottenere da questa analisi sperimentale riguardano l'identificazione della migliore configurazione, per risolvere il problema presentato, e la definizione di linee guida per la progettazione dei giunti ibridi.

Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto i professori, Giovanni Belingardi e Alessandro Scattina, i quali mi hanno accolto dandomi l'opportunità di realizzare questa tesi, mi hanno fornito sempre preziosi consigli e un enorme sostegno.

Un sentito grazie va anche alla tutor aziendale, Fiorenza Di Sciullo, che con la sua passione mi ha fatto conoscere questo mondo.

Ringrazio di cuore anche i colleghi del laboratorio che mi hanno sostenuto in questi mesi: Ignazio Alfeo, Giampaolo Fedele e Laura Montagnana.

Finalmente questo percorso di studi è terminato. Concluderlo non è stato così semplice: trasferirsi in una nuova città, ancora un po' estranea ma anche accogliente, lontana da tanti amici e familiari, cercando di conciliare studio e lavoro. Tante sono le persone che mi sono state vicino durante questi anni, con le quali ho condiviso gioie, risate, ansie e preoccupazioni, senza le quali non sarei la persona che sono oggi e che vorrei ringraziare per tutto quello che hanno fatto per me.

Vorrei subito ringraziare tutti miei colleghi di lavoro del gruppo Closures che mi hanno fatto sentire da subito parte integrante del gruppo, con i quali sto crescendo sia in ambito lavorativo che personale. Uno speciale ringraziamento va a Davide, Gaetano e Davide C., che negli ultimi mesi hanno vissuto a pieno con me questa tesi, ascoltando le mie preoccupazioni, supportandomi e per i mille "stai serena!".

Ringrazio particolarmente la mia famiglia, coloro che ci sono sempre stati e ci saranno. A mia mamma Donatella e mio padre Giuseppe, i miei pilastri e la mia guida. Grazie per tutto il vostro sostegno, per i vostri insegnamenti, per incoraggiarmi e consigliarmi. Grazie per riempirmi sempre di amore. Ai miei fratelli, Simone e Danilo, che nonostante tutto colorano le mie giornate.

Ringrazio tutti i miei carissimi amici e i colleghi di studio, con i quali ho condiviso bellissimi momenti, serate e risate.

Infine, non posso che ringraziare Giuseppe, il quale da parecchi anni condivide con me ogni momento della mia vita. Lo ringrazio perché è il mio compagno ma anche il mio migliore amico, con il quale posso parlare di tutto e mi capisce, mi ascolta e fa il tifo per me sempre, anche quando io sono la prima a non crederci.

Indice

Elenco delle tabelle	X
Elenco delle figure	XII
Elenco degli acronimi	XXI
I Panoramica generale	1
1 Introduzione	3
1.1 Obiettivo	3
1.2 Giunzioni ibride	4
1.3 Tecnologia di incollaggio	5
1.3.1 Configurazione di giunti incollati	6
1.3.2 Caratterizzazione del giunto	7
1.3.3 Meccanismi di adesione e cedimento	9
1.3.4 Vantaggi e svantaggi	11
1.3.5 Scelta dell'adesivo	13
1.3.6 Adesivi strutturali epossidici	14
1.3.7 Preparazione della superficie	16
1.3.8 Applicazione dell'adesivo	17
1.4 Tecnologia di fissaggio meccanico: rivettatura	18
1.4.1 Meccanismi di rottura	19
1.4.2 Scelta del rivetto	20
1.4.3 Applicazione del rivetto	22
1.4.4 Vantaggi e svantaggi	22
1.4.5 Pop rivet	22
2 Stato dell'arte	25
2.1 Rivet-bonding	25
2.1.1 Realizzazione della giunzione	26

2.1.2	Vantaggi e svantaggi	26
2.2	Stato dell'arte in CRF	27
2.3	Nuovi materiali metallici nel settore automotive	28
2.3.1	Acciai ad alta resistenza	28
2.3.2	Leghe di alluminio	29
3	Introduzione alle prove	31
3.1	Introduzione	31
3.2	Materiali utilizzati	31
3.2.1	Lamiere	32
3.2.2	Adesivi	32
3.2.3	Rivetti	33
3.2.4	Altri materiali	33
3.3	Strumenti utilizzati	34
II	Prove di resistenza al distacco per taglio	35
4	Attività preliminari	37
4.1	Metodo di realizzazione dei provini	37
4.1.1	Preparazione delle lamiere	38
4.1.2	Applicazione dell'adesivo	39
4.1.3	Cottura dei provini	40
4.1.4	Invecchiamento	40
4.2	Metodo per prova di taglio a trazione	40
4.2.1	Trazione condizionata in temperatura	41
5	Svolgimento	43
5.1	Obiettivo	43
5.2	Caso studio: Betamate 1822	43
5.2.1	Temperatura ambiente senza invecchiamento	44
5.2.2	Temperatura ambiente con invecchiamento 500h a 100°C	46
5.2.3	Temperatura ambiente con invecchiamento 500h in nebbia salina	48
5.2.4	Temperatura ambiente con invecchiamento 500h in CTUS	50
5.2.5	Temperatura di prova -40 °C senza invecchiamento	51
5.2.6	Temperatura di prova 80°C senza invecchiamento	53
5.3	Caso studio: Betamate 4600	54
5.3.1	Temperatura ambiente senza invecchiamento	55
5.3.2	Temperatura ambiente con invecchiamento 500h a 100°C	57
5.3.3	Temperatura ambiente con invecchiamento 500h in nebbia salina	59

5.3.4	Temperatura ambiente con invecchiamento 500h in CTUS	61
5.3.5	Temperatura di prova -40 °C senza invecchiamento	63
5.3.6	Temperatura di prova 80°C senza invecchiamento	64
5.4	Caso studio: Betamate 1424	66
5.4.1	Temperatura ambiente senza invecchiamento	66
5.4.2	Temperatura ambiente con invecchiamento 500h a 100°C	68
5.4.3	Temperatura ambiente con invecchiamento 500h in nebbia salina	69
5.4.4	Temperatura ambiente con invecchiamento 500h in CTUS	71
5.4.5	Temperatura di prova -40 °C senza invecchiamento	72
5.4.6	Temperatura di prova 80°C senza invecchiamento	74
5.5	Valutazione dell'elasticità	75

III Prove di dilatazione termica differenziata 77

6	Attività preliminari	79
6.1	Preparazione delle lamiere	79
6.2	Applicazione dell'adesivo	81
6.3	Applicazione dei rivetti	81
6.4	Scelta dei punti di misura	82
6.5	Cottura provini	83
7	Svolgimento prove di dilatazione termica	85
7.1	Obiettivo	85
7.2	Caso studio: Betamate 1822	86
7.2.1	Misura pacchetto lamiere	87
7.2.2	Misura gioco acciaio-alluminio	92
7.2.3	Misura gioco alluminio-alluminio	96
7.3	Caso studio: Betamate 4600	100
7.3.1	Misura pacchetto lamiere	100
7.3.2	Misura gioco acciaio-alluminio	105
7.3.3	Misura gioco alluminio-alluminio	109
7.4	Caso studio: Betamate 1424	113
7.4.1	Misura pacchetto lamiere	113
7.4.2	Misura gioco acciaio-alluminio	118
7.4.3	Misura gioco alluminio-alluminio	122
8	Prove di supporto: calorimetria differenziale a scansione	127
8.1	Principio di funzionamento e termogramma	127
8.2	Svolgimento della prova	128
8.2.1	Metodo di prova dinamico	129

8.2.2	Metodo di prova isoterma	131
-------	------------------------------------	-----

IV Risultati e conclusioni 133

9 Risultati prove di resistenza al distacco per taglio 135

9.1	Risultati	135
9.1.1	Confronto tra provini Betamate 1822	135
9.1.2	Confronto tra provini Betamate 4600	138
9.1.3	Confronto tra provini Betamate 1424	140
9.1.4	Confronto tra adesivi	142
9.2	Sviluppi futuri	149

10 Risultati prove di dilatazione termica differenziata 151

10.1	Risultati	151
10.1.1	Confronto misura pacchetto lamiera	151
10.1.2	Confronto gioco acciaio-alluminio	161
10.1.3	Confronto gioco alluminio-alluminio	171
10.1.4	Verifica con DSC	181
10.2	Conclusioni	181
10.3	Sviluppi futuri	182

Bibliografia 183

Elenco delle tabelle

2.1	Spessori delle lamiere utilizzate nei provini studio del CRF.	27
3.1	Materiali e spessori usati per la realizzazione dei provini in entrambe le prove.	32
3.2	Altri macchinari utilizzati per le prove.	34
4.1	Caratterizzazione dei provini impiegati nelle prove di resistenza a distacco per taglio	37
5.1	Serie di prove di resistenza a distacco per taglio	44
5.2	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura ambiente	45
5.3	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura ambiente	46
5.4	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini, invecchiati in nebbia salina, sottoposti a trazione a temperatura ambiente	48
5.5	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini, invecchiati in CTUS, sottoposti a trazione a temperatura ambiente	50
5.6	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini che hanno effettuato la prova di trazione a -40°C.	51
5.7	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini che hanno effettuato la prova di trazione a 80°C.	53
5.8	Serie di prove di resistenza a distacco per taglio	54
5.9	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura ambiente con adesivo specifico per giunti in alluminio	55
5.10	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini con invecchiamento termico e sottoposti a trazione a temperatura ambiente.	57
5.11	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini con invecchiamento 500 ore in nebbia salina e sottoposti a trazione a temperatura ambiente.	59
5.12	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini con invecchiamento 500 ore in CTUS e sottoposti a trazione a temperatura ambiente.	61

5.13	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura -40°C.	63
5.14	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura 80°C.	64
5.15	Serie di prove di resistenza a distacco per taglio	66
5.16	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura ambiente.	66
5.17	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura ambiente.	68
5.18	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini, invecchiati in nebbia salina, sottoposti a trazione a temperatura ambiente	69
5.19	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini, invecchiati in CTUS e sottoposti a trazione a temperatura ambiente	71
5.20	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini che hanno effettuato la prova di trazione alla temperatura di -40°C.	72
5.21	Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini che hanno effettuato la prova di trazione a 80°C.	74
5.22	Moduli di Young a temperatura ambiente, per ogni adesivo.	76
6.1	Quantità e caratteristiche dei provini realizzati	79
6.2	Posizione dei punti di misura, per ogni lato dei provini	83
9.1	Valori del carico massimo ottenuti nelle prove di trazione con adesivo <i>Betamate 1822</i>	136
9.2	Valori della tensione massima ottenuti nelle prove di trazione con adesivo <i>Betamate 1822</i>	136
9.3	Valori del carico massimo ottenuti nelle prove di trazione con adesivo <i>Betamate 4600</i>	138
9.4	Valori della tensione massima ottenuti nelle prove di trazione con adesivo <i>Betamate 4600</i>	138
9.5	Valori del carico massimo ottenuti nelle prove di trazione con adesivo <i>Betamate 1424</i>	140
9.6	Valori della tensione massima ottenuti nelle prove di trazione con adesivo <i>Betamate 1424</i>	140
10.1	Valori della temperatura e tempo di inizio reticolazione, per i tre adesivi.	181

Elenco delle figure

1.1	Tipologie e distribuzione delle sollecitazioni: trazione, compressione, taglio, clivaggio e peeling [4].	5
1.2	Configurazione di giunti incollati: a) single-lap joint; b) double-lap joint; c) single-strap joint; d) giunto a spigolo smussato; e) double-strap joint.	7
1.3	Forze di adesione e coesione in un giunto incollato	8
1.4	Zone del giunto incollato [2]	9
1.5	Rappresentazione dell'adesione meccanica: 1-adesivo, 2-sacche d'aria, 3-aderendo	10
1.6	Tipologie di distacco di una giunzione incollata: a) cedimento coesivo; b) cedimento adesivo	10
1.7	Confronto distribuzione delle tensioni, rivettatura e incollaggio.	12
1.8	Diagramma sforzo-allungamento a rottura per le varie tipologie di adesivi.	13
1.9	Molecola con terminali epossidici (resina)	14
1.10	Diammina (indurente)	14
1.11	Passi del miscelatore in funzione del numero di elementi costituenti l'adesivo	15
1.12	Esempi di due miscelatori statici e i suoi componenti	15
1.13	Miscelatore dinamico	16
1.14	Tipologie di applicazioni dell'adesivo: a) cordolo interrotto, b) mucchetti, c) cordolo continuo.	17
1.15	Tipologie di configurazione di giunti rivettati, sulla base del numero di superfici metalliche assemblate [15]	18
1.16	Giunto rivettato sollecitato a taglio [16].	19
1.17	Lamiera per rivettatura che cede per tranciamento [16].	20
1.18	Lamiera per rivettatura che cede per strappo [16].	20
1.19	Alcuni tipi di rivetti: a) rivetto autopercorante; b) rivetto guida; c) rivetto solido.	21

1.20	Configurazione di un rivetto pop: testa del rivetto (<i>rivet head</i>), stelo del rivetto <i>rivet pin</i> , testa del mandrino <i>mandrel head</i> e corpo del mandrino <i>mandrel</i>) [21].	23
1.21	Sezione di un giunto rivettato durante le fasi del processo di fissaggio: a) posizionamento del rivetto all'interno del pre-foro, b) deformazione del rivetto e rottura del mandrino[22]	23
2.1	Sezione di una giunzione incollata rivettata.	25
2.2	Sezione dei profilati studiati in GML.	27
2.3	Diagramma carico di snervamento in funzione dell'allungamento per alcuni tipi di acciai.	29
3.1	Tipologia di rivetti utilizzati per le prove di dilatazione termica differenziata	33
3.2	Filo di rame di diametro 0,5 mm e forma a V, utilizzato nei provini per le prove di resistenza a distacco per taglio.	33
4.1	Lamierini utilizzati nella realizzazione dei provini per le prove di resistenza a distacco per taglio: a sinistra acciaio, a destra alluminio.	38
4.2	Lamierini con la traccia di 12 mm dal bordo.	38
4.3	Esempio di applicazione dell'adesivo.	39
4.4	Esempio di applicazione del filo di rame.	39
5.1	Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 a temperatura ambiente	44
5.2	Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura ambiente	45
5.3	Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 e invecchiamento 500 ore a 100°C.	46
5.4	Superfici di frattura dei campioni sottoposti ad invecchiamento di 500 ore a 100°C e prova di trazione a temperatura ambiente	47
5.5	Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 e invecchiamento 500 ore in nebbia salina.	48
5.6	Superfici di frattura dei campioni sottoposti ad invecchiamento di 500 ore in nebbia salina, e prova di trazione a temperatura ambiente	49
5.7	Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 e invecchiamento 500 ore in camera umida CTUS.	50
5.8	Superfici di frattura dei campioni sottoposti ad invecchiamento di 500 ore CTUS, e prova di trazione a temperatura ambiente	51
5.9	Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 e prova di trazione a -40°C.	52

5.10	Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura di -40°C.	52
5.11	Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 e prova di trazione a 80°C.	53
5.12	Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura di 80°C.	54
5.13	Andamenti carico-corsa per campioni trazionati a temperatura ambiente con Betamate 4600.	55
5.14	Superfici di frattura dei campioni sottoposti alla prova di trazione a temperatura ambiente con adesivo specifico per giunti in alluminio	56
5.15	Andamenti carico-corsa per campioni invecchiati 500 ore a 100°C e trazionati a temperatura ambiente con Betamate 4600.	57
5.16	Superfici di frattura dei campioni invecchiati 500 ore a 100°C e sottoposti alla prova di trazione a temperatura ambiente	58
5.17	Superfici di frattura dei campioni invecchiati 500 ore in nebbia salina e sottoposti alla prova di trazione a temperatura ambiente con adesivo specifico per giunti in alluminio	60
5.18	Andamenti carico-corsa per campioni invecchiati 500 ore in nebbia salina e trazionati a temperatura ambiente con Betamate 4600.	60
5.19	Andamenti carico-corsa per campioni invecchiati 500 ore in CTUS e trazionati a temperatura ambiente con Betamate 4600.	61
5.20	Superfici di frattura dei campioni invecchiati 500 ore in CTUS e sottoposti alla prova di trazione a temperatura ambiente con adesivo specifico per giunti in alluminio	62
5.21	Andamenti carico-corsa per campioni di Betamate 4600 in prova condizionata in temperatura a -40°C.	63
5.22	Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura di -40°C.	64
5.23	Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 4600 e prova di trazione a 80°C.	65
5.24	Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura di 80°C.	65
5.25	Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1424 e prova di trazione a temperatura ambiente.	67
5.26	Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura ambiente.	67
5.27	Andamenti carico-corsa dei provini con invecchiamento 500 ore a 100°C.	68
5.28	Superfici di frattura dei campioni sottoposti a ciclo di invecchiamento 500 ore a 100°C.	69

5.29	Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1424 e invecchiamento 500 ore in nebbia salina.	70
5.30	Superfici di frattura dei campioni sottoposti ad invecchiamento 500 ore in nebbia salina e prova di trazione a temperatura ambiente. . .	70
5.31	Andamenti carico-corsa dei provini con Betamate 1424 e invecchiamento 500 ore in CTUS.	71
5.32	Superfici di frattura dei campioni sottoposti ad invecchiamento 500 ore in camera umida e prova di trazione a temperatura ambiente. .	72
5.33	Andamenti carico-corsa della prova di trazione alla temperatura di 40°C.	73
5.34	Superfici di frattura dei campioni sottoposti ad invecchiamento 500 ore in camera umida e prova di trazione a temperatura ambiente. .	73
5.35	Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 e prova di trazione a 80°C.	74
5.36	Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura di 80°C.	75
6.1	Sezioni delle lamiere a seguito della piegatura	80
6.2	Modalità di foratura dei provini.	80
6.3	Esempio di applicazione dell'adesivo cordolo continuo.	81
6.4	rivettatrice manuale e rivetti utilizzati	82
6.5	Operazione di rivettatura dei campioni: a) inserimento del rivetto nel foro della giunzione; b) aspetto del rivetto al termine dell'operazione di rivettatura.	82
7.1	Sezione e vista dall'alto dei provini realizzati con Betamate 1822: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	86
7.2	Valori medi della misura pacchetto lamiera per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	87
7.3	Valori medi della misura pacchetto lamiera per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	88
7.4	Valori medi della misura pacchetto lamiera per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	89
7.5	Tabelle riassuntive dei valori misurati del pacchetto lamiera: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	91
7.6	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	92
7.7	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	93
7.8	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	94

7.9	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	95
7.10	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	96
7.11	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	97
7.12	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	98
7.13	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	99
7.14	Sezione e vista dall'alto dei provini realizzati con Betamate 4600: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	100
7.15	Valori medi della misura spessore pacchetto per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	101
7.16	Valori medi della misura spessore pacchetto per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	102
7.17	Valori medi della misura spessore pacchetto per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	103
7.18	Tabelle riassuntive dei valori misurati del pacchetto lamiera: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	104
7.19	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	105
7.20	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	106
7.21	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	107
7.22	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	108
7.23	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	109
7.24	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	110
7.25	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	111
7.26	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	112
7.27	Sezione e vista dall'alto dei provini realizzati con Betamate 1424: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	113
7.28	Valori medi della misura spessore pacchetto per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	114

7.29	Valori medi della misura spessore pacchetto per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	115
7.30	Valori medi della misura spessore pacchetto per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	116
7.31	Tabelle riassuntive dei valori misurati del pacchetto lamiera: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	117
7.32	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	118
7.33	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	119
7.34	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	120
7.35	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	121
7.36	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	122
7.37	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	123
7.38	Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.	124
7.39	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	125
8.1	Esempio di un termogramma completo [36].	128
8.2	Termogramma della prova DSC dinamica: in rosso l'adesivo <i>Betamate 4600</i> , in nero l'adesivo <i>Betamate 1424</i> e in blu l'adesivo <i>Betamate 1822</i>	130
8.3	Termogramma della prova DSC isoterma: in rosso l'adesivo <i>Betamate 4600</i> , in nero l'adesivo <i>Betamate 1424</i> e in blu l'adesivo <i>Betamate 1822</i>	132
9.1	Grafici prove di trazione in varie condizioni: a) temperatura ambiente; b) temperatura -40°C; c) temperatura 80°C; d) invecchiamento 500 ore a 100°C; e) invecchiamento 500 ore CTUS; f) invecchiamento 500 ore nebbia salina.	137
9.2	Grafici prove di trazione in varie condizioni: a) temperatura ambiente; b) temperatura -40°C; c) temperatura 80°C; d) invecchiamento 500 ore a 100°C; e) invecchiamento 500 ore CTUS; f) invecchiamento 500 ore nebbia salina.	139

9.3	Grafici prove di trazione in varie condizioni: a) temperatura ambiente; b) temperatura -40°C; c) temperatura 80°C; d) invecchiamento 500 ore a 100°C; e) invecchiamento 500 ore CTUS; f) invecchiamento 500 ore nebbia salina.	141
9.4	Andamenti prove di trazione a temperatura ambiente al variare dl tipo di adesivo: a) <i>Betamate 1822</i> ; b) <i>Betamate 4600</i> ; c) <i>Betamate 1424</i>	143
9.5	Andamenti prove di trazione dopo invecchiamento 500 ore a 100°C variare dl tipo di adesivo: a) <i>Betamate 1822</i> ; b) <i>Betamate 4600</i> ; c) <i>Betamate 1424</i>	144
9.6	Andamenti prove di trazione dopo invecchiamento 500 ore in CTUS variare dl tipo di adesivo: a) <i>Betamate 1822</i> ; b) <i>Betamate 4600</i> ; c) <i>Betamate 1424</i>	145
9.7	Andamenti prove di trazione dopo invecchiamento 500 ora in NS, al variare dl tipo di adesivo: a) <i>Betamate 1822</i> ; b) <i>Betamate 4600</i> ; c) <i>Betamate 1424</i>	146
9.8	Andamenti prove di trazione a temperatura -40°C al variare dl tipo di adesivo: a) <i>Betamate 1822</i> ; b) <i>Betamate 4600</i> ; c) <i>Betamate 1424</i>	147
9.9	Andamenti prove di trazione a temperatura di 80°C, al variare dl tipo di adesivo: a) <i>Betamate 1822</i> ; b) <i>Betamate 4600</i> ; c) <i>Betamate 1424</i>	148
10.1	Valori della misura pacchetto lato sinistro con <i>Betamate 1822</i> : superiore prima cottura; inferiore dopo cottura.	152
10.2	Valori della misura pacchetto lato destro con <i>Betamate 1822</i> : superiore prima cottura; inferiore dopo cottura.	153
10.3	Valori della misura pacchetto lato sinistro con <i>Betamate 4600</i> : superiore prima cottura; inferiore dopo cottura.	154
10.4	Valori della misura pacchetto lato destro con <i>Betamate 4600</i> : superiore prima cottura; inferiore dopo cottura.	155
10.5	Valori della misura pacchetto lato sinistro con <i>Betamate 1424</i> : superiore prima cottura; inferiore dopo cottura.	156
10.6	Valori della misura pacchetto lato destro con <i>Betamate 1424</i> : superiore prima cottura; inferiore dopo cottura.	157
10.7	Tabelle riassuntive dei valori misurati dello spessore pacchetto lamiera con adesivo <i>Betamate 1822</i> : a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	158
10.8	Tabelle riassuntive dei valori misurati dello spessore pacchetto lamiera con adesivo <i>Betamate 4600</i> : a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	159

10.9	Tabelle riassuntive dei valori misurati dello spessore pacchetto lamiera con adesivo <i>Betamate 1424</i> : a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	160
10.10	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo <i>Betamate 1822</i> , lato sinistro: a) prima cottura; b) dopo cottura.	162
10.11	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo <i>Betamate 1822</i> , lato destro: a) prima cottura; b) dopo cottura.	163
10.12	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo <i>Betamate 4600</i> , lato sinistro: a) prima cottura; b) dopo cottura.	164
10.13	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo <i>Betamate 4600</i> , lato destro: a) prima cottura; b) dopo cottura.	165
10.14	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo <i>Betamate 1424</i> , lato sinistro: a) prima cottura; b) dopo cottura.	166
10.15	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo <i>Betamate 1424</i> , lato destro: a) prima cottura; b) dopo cottura.	167
10.16	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio con adesivo <i>Betamate 1822</i> : a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	168
10.17	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio con adesivo <i>Betamate 4600</i> : a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	169
10.18	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio con adesivo <i>Betamate 1424</i> : a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	170
10.19	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio per l'adesivo <i>Betamate 1822</i> , lato sinistro: a) prima cottura; b) dopo cottura.	172
10.20	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio per l'adesivo <i>Betamate 1822</i> , lato destro: a) prima cottura; b) dopo cottura.	173
10.21	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio per l'adesivo <i>Betamate 4600</i> , lato sinistro: a) prima cottura; b) dopo cottura.	174
10.22	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo <i>Betamate 4600</i> , lato destro: a) prima cottura; b) dopo cottura.	175

10.23	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio per l'adesivo <i>Betamate 1424</i> , lato sinistro: a) prima cottura; b) dopo cottura.	176
10.24	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio per l'adesivo <i>Betamate 1424</i> , lato destro: a) prima cottura; b) dopo cottura.	177
10.25	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio con adesivo <i>Betamate 1822</i> : a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	178
10.26	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio con adesivo <i>Betamate 4600</i> : a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	179
10.27	Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio con adesivo <i>Betamate 1424</i> : a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.	180

Elenco degli acronimi

WLTP Worldwide Harmonized Light Vehicles

NEDC New European Driving Cycle

CRF Centro Ricerche Fiat

GML Group Materials Labs

AHSS Advanced High Strength Steels

RSW Resistance Spot Welding

ZTA Zona Termicamente Alterata

ZTI Zona Termicamente Inalterata

TA Temperatura Ambiente

PC Prima Cottura

DC Dopo Cottura

DSC Differential Scanning Calorimetry

Parte I

Panoramica generale

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Obiettivo

Il lavoro di tesi è stato sviluppato all'interno del Group Materials Labs (GML) del Centro Ricerche Fiat (CRF), in collaborazione con il Politecnico di Torino. Nello specifico, il progetto riguarda la caratterizzazione delle dilatazioni termiche differenziate nei giunti ibridi, rivetti e adesivi, in strutture multi-materiale acciaio e alluminio.

Infatti uno scenario affrontato in azienda, nell'assemblaggio di tali strutture, è la dilatazione termica differenziata dei due materiali durante il processo di cottura cataforesi di un veicolo. Le temperature raggiunte dalla cottura cataforesi sono superiori i 160 °C, di conseguenza, i materiali si dilatano in modo differente in quanto presentano un diverso coefficiente di dilatazione termica (acciaio circa $12 \cdot 10^{-6}$ [1/°C], alluminio circa $23 \cdot 10^{-6}$ [1/°C]). Nel caso in cui l'adesivo non riesca a compensare tali dilatazioni, si manifesta il fenomeno del festonamento, e la funzionalità e resistenza delle parti coinvolte può essere compromessa.

L'obiettivo della ricerca è stato sintetizzato in: identificazione della migliore configurazione della giunzione che permetta di evitare il fenomeno del festonamento, e la definizione di linee guida per la progettazione di giunti ibridi.

Il lavoro di tesi, per una più facile esposizione, è stato suddiviso in tre parti.

La parte 1 vuole introdurre il problema alla base dello studio, fornendo una panoramica delle giunzioni ibride, delle tecnologie di incollaggio e di fissaggio meccanico, dello stato dell'arte per le giunzioni *rivet-bonding* e dei materiali di sviluppo nel settore automotive.

La parte 2 e la parte 3 analizzano in dettaglio la ricerca svolta. In particolare verrà esposta la fase di preparazione dei provini e le prove condotte. Queste ultime

comprendono sia delle prove di resistenza al distacco per taglio dell'adesivo, dopo varie simulazioni di cottura, che prove di dilatazione termica differenziata. In entrambi i casi vengono utilizzati degli adesivi strutturali epossidici.

Le prove di dilatazione termica differenziata sono state ripetute al variare della tipologia di adesivo. In particolare sono state valutate le prestazioni dei giunti in caso di utilizzo dell'adesivo adatto alle giunzioni ibride (come Betamate 1822), adesivo per giunti in alluminio (Betamate 4600) e adesivo per giunti in acciaio (Betamate 1424). Invece, per quanto riguarda i fissaggi meccanici presenti, questi non subiranno variazioni nel corso delle prove, ma saranno mantenuti sempre ad una certa distanza (passo) gli uni dagli altri.

Infine, nella parte 4 vuole delineare le linee guida per la progettazione delle giunzioni ibride e mostrare i risultati ottenuti nella ricerca della migliore configurazione per risolvere il problema presentato del mancato ritorno elastico delle lamiere.

1.2 Giunzioni ibride

Come detto precedentemente, l'oggetto dello studio sono le giunzioni ibride. Queste sono una tecnologia, piuttosto recente, adottata in ambito automotive per la giunzione di materiali leggeri. Infatti, per soddisfare i requisiti di conformità della normativa ambientale, l'industria automobilistica ricerca materiali sempre più leggeri e performanti in sostituzione ai materiali convenzionali. Tuttavia la sostituzione di un materiale rispetto ad un altro comporta un cambiamento dei processi per unire i materiali leggeri, sia per configurazioni di giunzioni simili, che per configurazioni di giunzioni dissimili. Grazie alle giunzioni ibride, i costruttori di automobili possono assemblare strutture con materiali leggeri, riducendo di conseguenza il peso del veicolo, ma garantendo ottime performance e maggiore sicurezza dei passeggeri.

Per giunzioni ibride si intende una tecnologia di giunzione che utilizza contemporaneamente una tecnica di giunzione tradizionale (meccanica o termica) e la tecnologia di incollaggio adesiva. Lo scopo è quello di ottenere un giunto con migliori proprietà (come resistenza, costo ed altro), rispetto al caso di un giunto semplice. Distinguiamo la *rivet-bonding*, nata dalla combinazione della giunzione meccanica con adesiva, mentre la *weld-bonding* nel caso di combinazione della saldatura con l'incollaggio.

Nei capitoli successivi verranno illustrate le tecnologie alla base di una giunzione ibrida *rivet-bonding*, oggetto dello studio di tesi. In particolare, nel capitolo 1.3 si ha una panoramica dei principi base della tecnologia di incollaggio, mentre si parlerà nel capitolo 1.4 delle tecnologie di fissaggio meccanico applicata nelle giunzioni ibride di tale tesi.

1.3 Tecnologia di incollaggio

L'incollaggio è il processo tecnologico che permette l'unione di materiali per mezzo dell'interposizione di un adesivo. La tecnologia di incollaggio di adesivi viene applicata nell'industria *automotive* da tanti anni. Recentemente trova campo nelle applicazioni strutturali, infatti, le auto moderne contengono fino a 150 metri di parti incollate nella scocca [2], valore che si presuppone tenda ancora ad aumentare.

L'incollaggio di adesivi, come tecnologia di giunzione, permette l'assemblaggio di materiali dissimili, in particolar modo per parti del veicolo in acciaio e alluminio. I giunti che si ottengono presentano, rispetto le tecniche di giunzione tradizionali, una migliore distribuzione delle tensioni, maggiore resistenza a fatica, capacità di sigillatura e ridotte vibrazioni.

Il comportamento meccanico della giunzione adesiva è determinato dalle proprietà meccaniche dei materiali da assemblare, dall'estensione della zona di contatto, dalla geometria del giunto, dalla presenza di eventuali tensioni residue, dalla resistenza dell'adesivo e dalla direzione di applicazione del carico [3].

In figura 1.1 sono riportate le tipologie di sollecitazione a cui può essere soggetto il giunto: trazione, compressione, taglio, clivaggio e *peeling*.

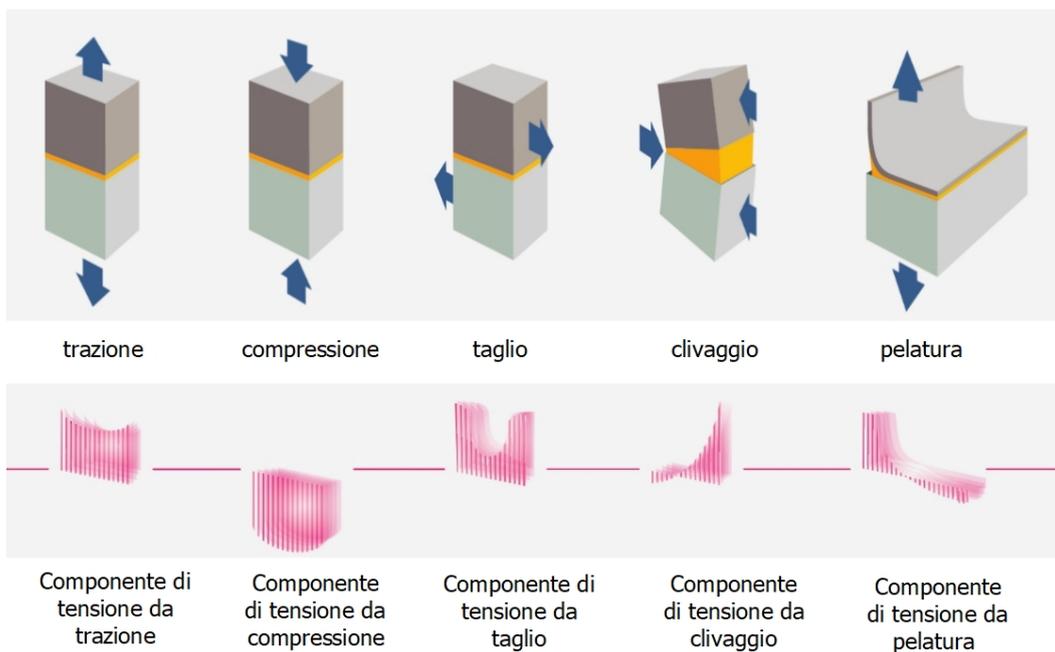


Figura 1.1: Tipologie e distribuzione delle sollecitazioni: trazione, compressione, taglio, clivaggio e peeling [4].

Si parla di trazione e di compressione, quando le sollecitazioni sono perpendicolari rispetto la superficie di adesione e sono distribuite uniformemente su tutta la superficie. La differenza tra loro consiste nel fatto che i carichi di compressione, essendo diretti verso la giunzione, tendono a favorire l'adesione dei substrati mentre rendono difficile il cedimento; mentre quando il giunto è sottoposto a carichi di trazione il cedimento parte dai bordi e si propaga velocemente.

Si parla invece di sollecitazione di *taglio* quando il carico agisce parallelamente alla superficie di giunzione. La distribuzione delle tensioni risulta essere maggiore alle estremità, provocando la torsione e la separazione degli aderendi. Nonostante ciò, gli adesivi, presentano delle buone caratteristiche di resistenza al taglio, in quanto la superficie attiva della giunzione è più estesa rispetto le altre condizioni.

Il *cleavage* e il *peeling* sono sollecitazioni causati da forze applicate ad una estremità del giunto e sono particolarmente indesiderati. In questo caso le prestazioni degli adesivi sono inferiori [4].

1.3.1 Configurazione di giunti incollati

L'obiettivo per una buona progettazione di una giunzione incollata è quello di ottenere un giunto che abbia la stessa resistenza degli elementi collegati (efficienza 100%), in modo da evitare sia inutili sovradimensionamenti del giunto sia sottodimensionamenti [5].

Le tipologie di giunti più frequenti sono:

- giunto a sovrapposizione singola (single-lap joint) (figura 1.2a), utilizzata specialmente nel caso di giunzioni sottili;
- giunto a sovrapposizione doppia (double-lap joint) (figura 1.2b): permette di ottenere una resistenza del giunto maggiore, rispetto al caso precedente;
- giunzione a spallina singola (single-strap joint) (figura 1.2c): permette di ottenere superfici lisce senza lavorazioni aggiuntive;
- giunto a spigolo smussato (Figura 1.2d): presenta una buona resistenza, ma è realizzabile solo con substrati spessi;
- giunzione a spallina doppia (double-strap joint) (Figura 1.2e): rispetto alla singola è più resistente ma anche più complicata.

La tipologia *single-lap joint* è la più utilizzata, in quanto presenta una semplicità nella realizzazione, ottima resistenza meccanica ed economicità. Infatti, andando verso la *double-strap joint* aumentano gli spessori degli elementi da collegare, e quindi della resistenza richiesta, ma anche il costo [5].

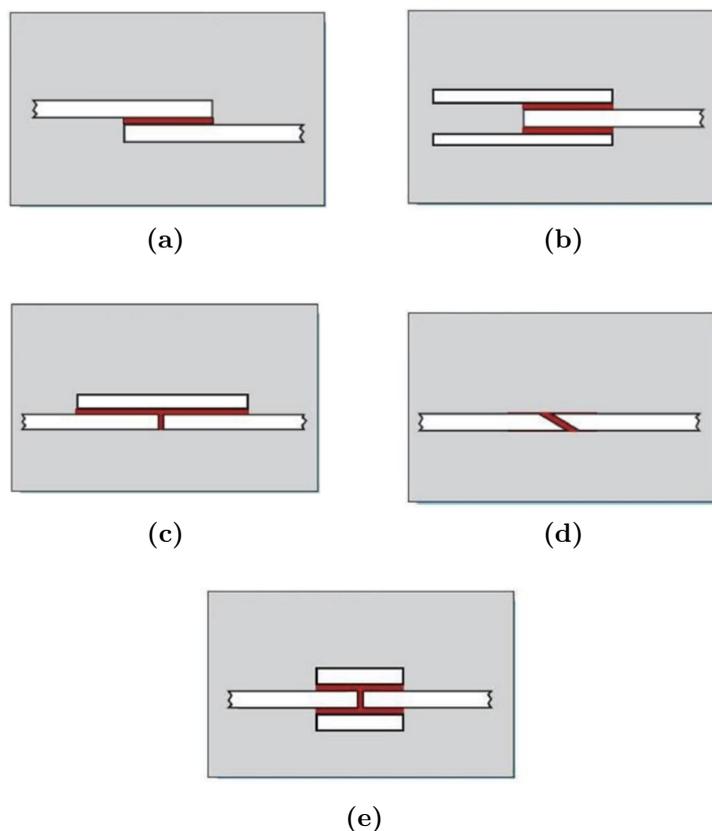


Figura 1.2: Configurazione di giunti incollati: a) single-lap joint; b) double-lap joint; c) single-strap joint; d) giunto a spigolo smussato; e) double-strap joint.

1.3.2 Caratterizzazione del giunto

Una giunzione incollata è costituita da adesivo e aderendi.

L'**adesivo** è l'elemento centrale della giunzione. È un polimero, naturale o sintetico, che ha il ruolo di realizzare l'adesione. Solitamente vengono aggiunti altri costituenti, come cariche metalliche, minerali o ceramiche, che migliorano le capacità adesive e la stabilità dell'adesivo stesso. In particolare, le sostanze aggiuntive, permettono di modificare la viscosità e la fluidità (*resine non reattive*), aumentare la resistenza dell'adesivo (*riempitivi*), migliorare la proprietà reologiche (*plastificanti*), evitare le reazioni di polimerizzazione in presenza di ossigeno o radiazioni (*stabilizzanti*) o fungere da catalizzatori per favorire la polimerizzazione.

Una definizione più tecnica di adesivo viene fornita dalla norma UNI EN 923 che identifica l' **adesivo** come una sostanza non metallica, in grado di congiungere materiali, non necessariamente simili, mediante fissaggio superficiale (**adesione**), e

in modo tale che il legame ottenuto possieda adeguata forza interna (**coesione**).

Per *adesione* si intende il risultato dell'interazione meccanica e dell'interazione chimico fisica tra la superficie dell'adesivo polimerico e l'altro materiale. Per *coesione* si intendono le interazioni all'interno dell'adesivo.

Con il termine **aderendo** invece si identificano i componenti a cui l'adesivo aderisce. Le superfici dei due aderendi possono essere dissimili.

Nella figura 1.3 è possibile osservare le forze di adesione tra aderendo e adesivo (in verde), mentre le forze di coesione (in rosso) si sviluppano tra le molecole dello stesso adesivo.

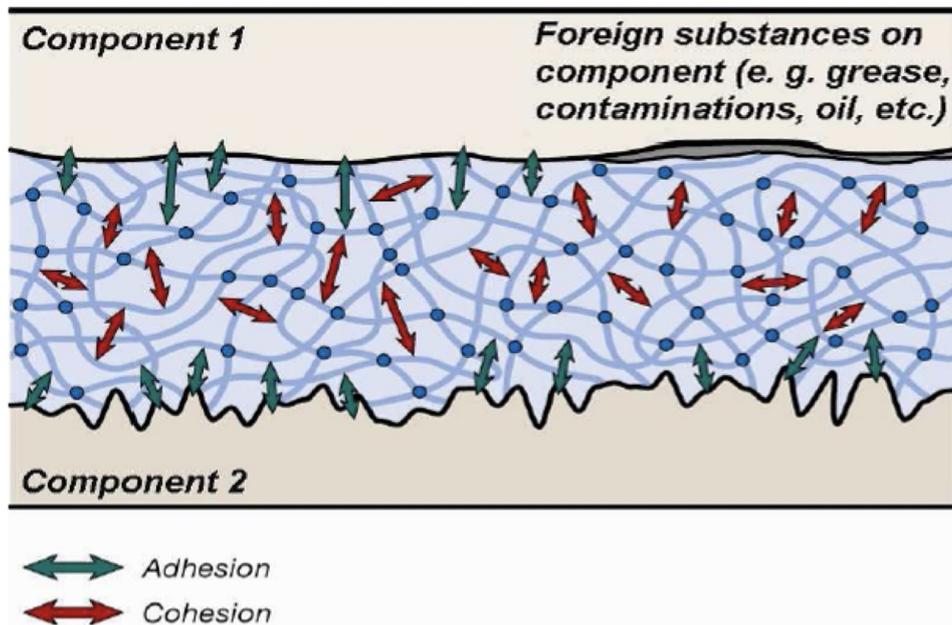


Figura 1.3: Forze di adesione e coesione in un giunto incollato

Si ha un buon incollaggio quando l'adesione prevale sulla coesione.

Osservando la sezione di un giunto incollato della figura 1.4 possiamo distinguere, oltre gli aderendi e l'adesivo:

- zona di adesione: è la zona di contatto tra l'adesivo e gli aderendi. L'adesivo presenta delle proprietà, strutturali e composizione, diverse dal nominale;
- zona di transizione: si assiste al cambiamento delle proprietà meccaniche, chimiche, ottiche dell'adesivo. Lo spessore di tale strato non è costante, ma può variare (da alcuni nanometri fino a millimetri) in funzione delle superfici del substrato, adesivo e condizioni di indurimento [2];

- zona di coesione: è la zona in cui l'adesivo presenta le proprietà nominali, riportate nella scheda tecnica.



Figura 1.4: Zone del giunto incollato [2]

Tutte le zone del giunto, zona di adesione, coesione e transizione, contribuiscono nel determinare la forza di adesione tra adesivo e aderendo.

1.3.3 Meccanismi di adesione e cedimento

La forza di adesione è il risultato dell'interazione tra l'interfaccia dell'adesivo e le superfici degli aderenti.

Le principali teorie sui meccanismi di adesione proposte in letteratura sono:

- *teoria dell'adesione chimica*: l'adesione è dovuta alla formazione dei legami chimici (ionico, covalente, idrogeno) tra adesivo e substrato;
- *teoria dell'interazione elettrostatica*: quando l'adesivo e gli aderenti presentano una diversa struttura elettronica, si ha il trasferimento di elettroni tra le molecole della superficie dell'adesivo e aderendo;
- *teoria dell'adesione meccanica*: la superficie di un materiale non è perfettamente liscia (rugosità) ma presentano delle piccole irregolarità superficiali che possono essere riempite dall'adesivo (figura 1.5);
- *teoria della bagnabilità*: affinché l'adesivo possa entrare in contatto con l'aderendo (*bagnabilità*), occorre che questo sia il più fluido possibile, per favorire la sua distribuzione sulla superficie, e che esse stesse siano pulite [6]. La

resistenza della giunzione risulta essere direttamente proporzionale alla viscosità dell'adesivo e all'estensione della zona incollata, mentre inversamente proporzionale allo spessore.

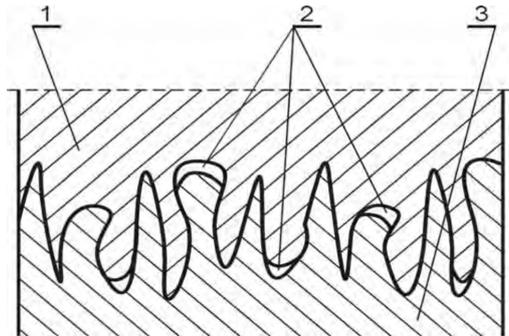


Figura 1.5: Rappresentazione dell'adesione meccanica: 1-adesivo, 2-sacche d'aria, 3-aderendo

L'adesione presente tra adesivo e aderendi comunque non esula dalla possibilità di cedimento. In particolare, le modalità di cedimento di una giunzione incollata sono il cedimento coesivo e il cedimento adesivo.

Il *cedimento coesivo* si verifica quando uno strato di adesivo rimane in entrambe le superfici degli aderendi; il *cedimento adesivo* si ha quando l'adesivo rimane solo su una superficie degli aderendi. Nella realtà, invece, non si verifica solo un tipo di cedimento, ma questi possono coesistere. Si parla allora di *cedimento misto* quando nella superficie di rottura si individuano delle zone di cedimento sia coesivo che adesivo.

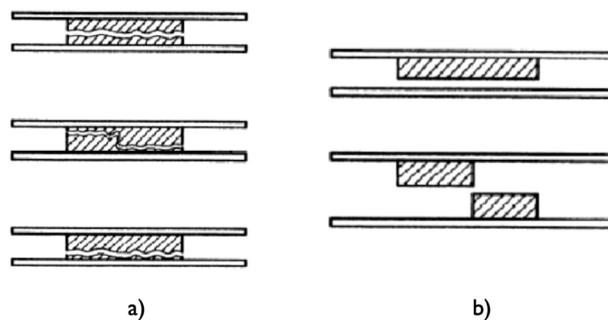


Figura 1.6: Tipologie di distacco di una giunzione incollata: a) cedimento coesivo; b) cedimento adesivo

Analizzando la zona di rottura è possibile capire le cause del cedimento. Ad esempio un cedimento adesivo può verificarsi a causa di una errata preparazione del giunto o per incompatibilità tra adesivo e aderendo.

La modalità di rottura ideale della giunzione è determinata dal cedimento coesivo. Nella realtà si riscontrano cedimenti dei giunti per modalità mista.

1.3.4 Vantaggi e svantaggi

Lo sviluppo delle giunzioni adesive nasce principalmente dalla possibilità di realizzare un legame stabile tra substrati diversi, per geometria, spessore e materiali. Ad esempio la giunzione di materiali compositi non è possibile con la saldatura, in quanto porta a fusione una parte del materiale, mentre non risulta essere conveniente con le tecniche di fissaggio meccanico, in quanto la presenza di fori indebolisce il materiale.

Inoltre, a differenza dei giunti saldati, non avendo con gli adesivi la presenza di una zona termicamente alterata, i substrati lavorano al massimo delle loro caratteristiche meccaniche. La zona di giunzione risulta essere molto più estesa e continua, in quanto non abbiamo bisogno di un passo minimo da garantire tra due giunzioni successive.

Il vantaggio è che le tensioni risultano essere distribuite uniformemente [7] (minimizzando la concentrazione di tensioni).

In figura 1.7 si può osservare l'andamento delle tensioni, confrontando un giunto rivettato con un giunto incollato : in prossimità del rivetto notiamo una maggiore concentrazione delle tensioni, mentre queste sono uniformemente distribuiti nel caso di utilizzo dell'adesivo.

Altri *vantaggi* degli incollaggi, sono:

- impediscono la corrosione degli aderendi: efficaci sia nel caso di corrosione galvanica (verificabile in presenza di giunzioni metalliche eterogenee), sia a causa di ristagno e infiltrazione di acqua e sostanze aggressive [8];
- versatilità e facilità di attrezzamento: possibilità di usare un adesivo per incollare materiali diversi, e un'unica attrezzatura per componenti diversi[9];
- maggiore funzionalità: l'adesivo riesce ad assolvere più compiti, come trasmissione degli sforzi meccanici, sigillatura, prevenzione dalla corrosione e contenimento delle dilatazioni termiche differenziali; [9]
- riduzione di peso: possibilità unire componenti molto sottili (spessore « 0,5 mm) [10];
- trasferimento elevate sollecitazioni di taglio: ad esempi o gli adesivi epossidici, utilizzati in questo studio, presentano una resistenza a taglio di 40Mpa [2]

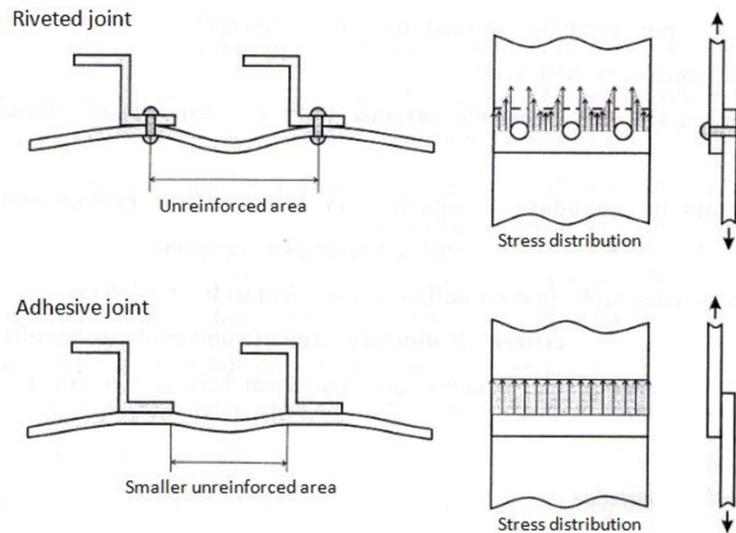


Figura 1.7: Confronto distribuzione delle tensioni, rivettatura e incollaggio.

- possibilità di unire varie forme: dai piccoli elementi alle grandi superfici[11];

Nonostante i numerosi vantaggi, è bene valutare attentamente l'introduzione di tale tecnologia, in funzione dell'applicazione, in quanto presenta delle possibili limitazioni come sotto riportati:

- bassa resistenza termica, in quanto gli adesivi sono composti organici;
- sono necessarie certe condizioni, di tempo e di calore, affinché l'adesivo polimerizzi);
- processo richiede estrema pulizia: l'adesione meccanica è influenzata dalla morfologia delle superfici da giuntare. Nello specifico, riferendoci al processo di produzione del veicolo, le superfici delle lamiere presentano varie sostanze chimiche derivate dalle lavorazioni precedenti (lubrificante, sporco, polveri) che è necessario rimuovere prima dell'applicazione dell'adesivo;
- sono influenzati dalle condizioni ambientali, come temperatura, pressione e umidità;
- i giunti incollati non sono smontabili e sono di difficile ispezione.

Possiamo concludere però che i vantaggi superano gli svantaggi.

1.3.5 Scelta dell'adesivo

Non esiste un unico adesivo per tutte le tipologie di giunti: ogni giunto ha il suo adesivo.

La scelta dell'adesivo ottimale, per una data applicazione, è molto complicata. Bisogna tenere conto delle finalità dell'incollaggio (strutturale o sigillante), requisiti meccanici richiesti, materiali da incollare, forma e dimensione delle superfici, ma anche delle caratteristiche che deve avere l'adesivo per "resistere" al processo pianificato. Ad esempio è necessario conoscere le modalità di erogazione dell'adesivo (manuale o automatizzato), le condizioni di esercizio o la velocità di polimerizzazione dell'adesivo.

In letteratura, vi sono differenti classificazioni degli adesivi:

- tipologia di polimero
- metodo di polimerizzazione
- funzione dell'adesivo

Gli adesivi di nostro interesse sono gli **adesivi strutturali**, facente parte della classificazione in base alla funzione dell'adesivo. Si intende un materiale, di comprovata affidabilità, che può essere sollecitato per un lungo periodo, ad un carico paragonabile alla sua tensione di rottura senza mostrare cedimenti [3]. In particolare in questo studio di tesi sono stati utilizzati gli adesivi strutturali epossidici.

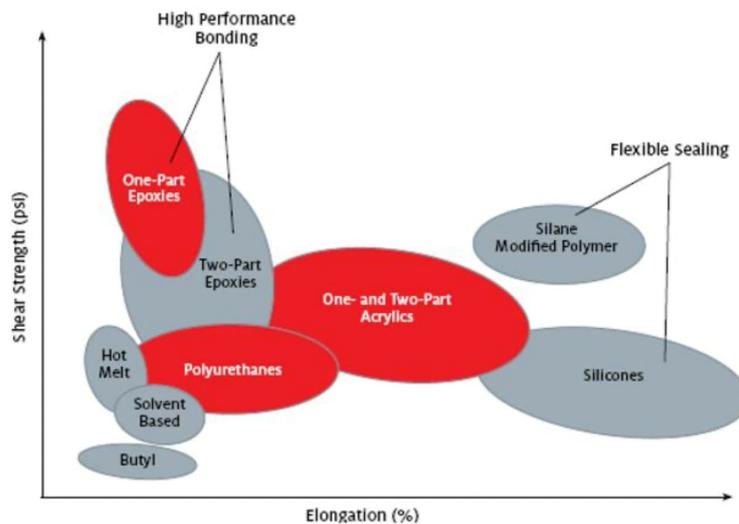


Figura 1.8: Diagramma sforzo-allungamento a rottura per le varie tipologie di adesivi.

Nel diagramma di figura 1.8 possiamo vedere le proprietà, tensione e allungamento a rottura, delle varie famiglie di adesivi. Vediamo come è importante scegliere l'adesivo avendo chiaro il suo ruolo nell'applicazione, in quanto la soluzione ottimale non è sempre la ricerca dell'elemento con più alte caratteristiche meccaniche: maggiore è la tensione di rottura, più l'adesivo risulta fragile.

1.3.6 Adesivi strutturali epossidici

Rappresentano la tipologia di adesivi strutturali più utilizzati. Hanno la capacità di unire diversi substrati mostrando eccellenti prestazioni dal punto di vista strutturale, sia nelle giunzioni metallo-metallo, che con substrati plastici (termoplastici e termoresistenti), calcestruzzo e vetro [12]. Hanno resistenze a taglio molto elevate, di contro presentano una minore resistenza a peeling e un modesto allungamento a rottura.

Dal punto di vista chimico l'adesivo è costituito da un gruppo epossidico (resina, figura 1.9) ed una diammina (indurente, figura 1.10), tra i quali avviene una reazione di reticolazione.

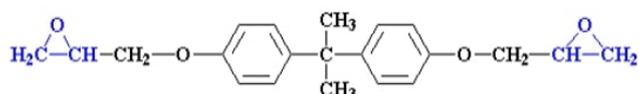


Figura 1.9: Molecola con terminali epossidici (resina)



Figura 1.10: Diammina (indurente)

Gli adesivi epossidici si trovano in commercio sia nella formulazione *monocomponente* che *bicomponente*. In un sistema monocomponente, resina ed indurente sono precedentemente miscelati. La reazione di polimerizzazione avviene per effetto del calore: in particolare, per i prodotti automobilistici si sfrutta il calore della cottura cataforesi.

Un tipico sistema bicomponente è costituito da una resina epossidica e un indurente, confezionati separatamente, e miscelati tramite degli opportuni ugelli

in modo da garantirne il corretto mescolamento. La miscelazione dei due componenti, resina e indurente, può avvenire attraverso una miscelazione statica o una miscelazione dinamica.

Miscelazione statica La miscelazione statica degli adesivi bicomponenti sfrutta un *ugello miscelatore*, specifico per ogni applicazione e dipende da vari fattori quali la composizione chimica dei due elementi, la viscosità, il rapporto di miscelazione e la dimensione delle cartucce.

Il miscelatore deve essere progettato con un numero di passi di miscelazione tali da garantire ai due materiali, resina e indurente, di mescolarsi completamente (figura 1.11).

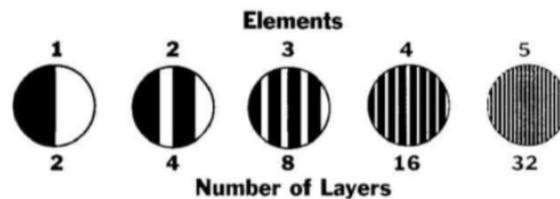


Figura 1.11: Passi del miscelatore in funzione del numero di elementi costituenti l'adesivo

Solitamente il miscelatore è in PE e monouso: dopo le fermate produttive non può essere riutilizzato ma deve essere sostituito. Come si può vedere dalla figura 1.12, un miscelatore statico è costituito da due parti, un ugello e una matrice, posta all'interno dell'ugello stesso, grazie alla quale per azione meccanica i due materiali vengono mescolati.

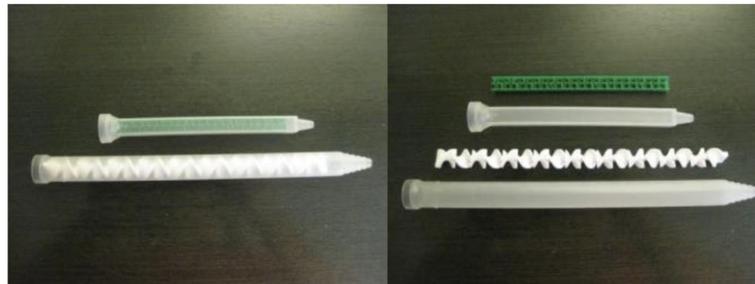


Figura 1.12: Esempi di due miscelatori statici e i suoi componenti

Miscelazione dinamica In questo caso il miscelatore è in acciaio o alluminio (figura 1.13), rotante ad una velocità di 1000-2500 rpm. I due componenti arrivano al miscelatore separati ed escono miscelati da un ugello lungo almeno 100 mm. Il dosaggio dei due componenti è stabilito a monte.



Figura 1.13: Miscelatore dinamico

A differenza del miscelatore statico, questo tipo di miscelatore non è monouso, ma necessita di uno spurgo, dopo le fermate produttive, e di una periodica ripulitura chimica e meccanica.

1.3.7 Preparazione della superficie

L'applicazione dell'adesivo su una superficie prevede, in primo luogo, la preparazione della superficie stessa, con l'obiettivo di garantire una migliore bagnabilità e adesione, un'adeguata interazione tra aderendo e adesivo, una migliore stabilità nel tempo.

Le superfici dei materiali aderenti possono presentare delle impurezze come ossidi, oli, polveri. Ad esempio, durante la produzione delle lamiere metalliche, vengono utilizzati degli oli come lubrificanti per facilitare l'imbutitura e per proteggere dalla corrosione.

I trattamenti superficiali da effettuare dipendono dal materiale, sia dell'adesivo che del substrato, dall'ambiente di esercizio e infine dall'applicazione dell'adesivo.

Si distinguono tre tipologie di trattamento superficiale: preparazione delle superfici, pre-trattamento superficiale, post-trattamento superficiale.

La *preparazione delle superfici* consiste essenzialmente nella pulizia delle superfici, determinando la rimozione delle impurezze presenti su di essa. Alcuni esempi di tecniche di preparazione delle superfici sono la sgrassatura e la disossidazione.

Il *pre-trattamento superficiale*, detto anche trattamento superficiale primario, consiste nell'utilizzo di tecniche meccaniche, chimiche o fisiche. Lo scopo può essere la rimozione di strati fortemente adsorbiti sulla superficie o per rendere reattiva la superficie (aumento dell'energia superficiale).

Il *post-trattamento superficiale*, o trattamento superficiale secondario, identifica tutte le tecniche utilizzate con lo scopo di migliorare le caratteristiche del giunto e proteggerne la superficie. Tra queste tecniche un esempio è l'applicazione del primer (promotori di adesione). Sono dei rivestimenti organici, conduttivi o non conduttivi, applicati come film sottili sull'aderendo.

1.3.8 Applicazione dell'adesivo

I metodi di applicazione dell'adesivo devono garantire che l'adesivo bagni correttamente le superfici aderenti, senza lasciare vuoti, in quanto la *bagnabilità* è necessaria affinché ci sia adesione [2].

Gli adesivi possono essere applicati in forma liquida o solida, con metodi manuali o automatici [7]. Per la bassa *viscosità*, gli adesivi liquidi risultano facilmente applicabili [13], ma è necessario garantire un certo tempo affinché questi si induriscano per riuscire a trasmettere i carichi imposti.

L'applicazione *manuale* viene utilizzata per casi semplici e piccoli, ad esempio per la realizzazione dei campioni da laboratorio o per piccole riparazioni.

L'erogazione dell'adesivo è realizzata tramite delle semplici pistole erogatrici, in cui vengono inserite le cartucce contenente l'adesivo. Si utilizzano due cartucce, convoglianti nello stesso ugello, nel caso di adesivi bicomponenti.

L'applicazione *automatica* consiste in una erogatore che gestisce autonomamente il quantitativo di adesivo necessario. Il sistema è costituito da una pompa che preleva il quantitativo di adesivo da un barile e lo porta alla bocca di dosaggio.

L'applicazione automatica viene utilizzata nei casi industriali.

Alcuni esempi di applicazione dell'adesivo vengono proposti nella figura 1.14.

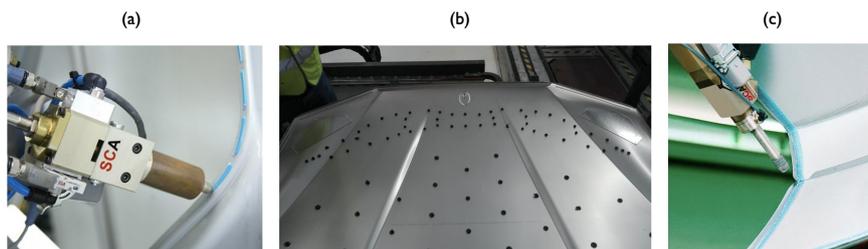


Figura 1.14: Tipologie di applicazioni dell'adesivo: a) cordolo interrotto, b) mucchetti, c) cordolo continuo.

1.4 Tecnologia di fissaggio meccanico: rivettatura

Per la realizzazione delle giunzioni ibride in laboratorio, è stato utilizzato un **rivetto** come dispositivo di fissaggio meccanico. La scelta nell'utilizzo del rivetto risiede nella sua semplicità di applicazione in condizioni manuali, a differenza delle viti.

Un generico rivetto è composto da una testa e uno stelo (chiamato coda) [14]. Lo stelo può essere cilindrico o tubolare, mentre in commercio si trovano varie tipologie di testa come tonda, svasata, larga o teste speciali.

Per la progettazione di una giunzione rivettata, bisogna considerare i tipi di carichi da trasferire, la temperatura di esercizio, la possibile corrosione nell'ambiente di esercizio, la disposizione dei rivetti (file di rivetti, passo, distanza dai bordi), l'accessibilità della giunzione e quindi la tipologia di rivetto, il materiale e la dimensione di questi elementi di fissaggio.

Considerando i carichi da trasferire, un rivetto si comporta molto bene quando sottoposto a carichi di *peeling*, mentre non riesce a trasmettere eccessivi sforzi di taglio (in contrapposizione con il comportamento degli adesivi).

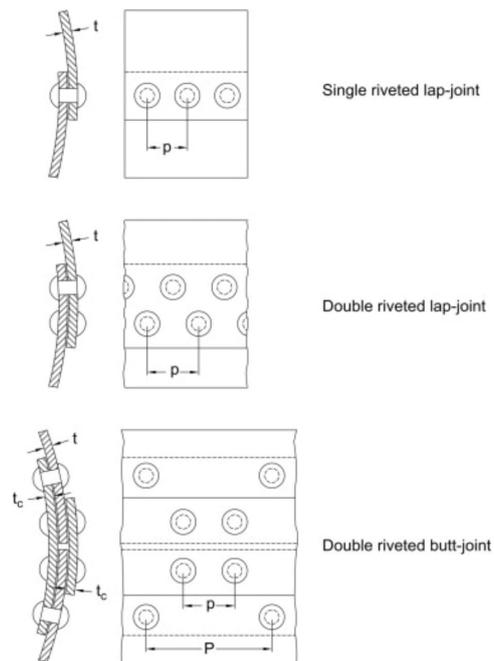


Figura 1.15: Tipologie di configurazione di giunzioni rivettate, sulla base del numero di superfici metalliche assemblate [15]

I giunti rivettati possono essere classificati in due categorie: giunti sovrapposti (*lap-joint*) e giunti di testa (*butt-joint*).

Come è possibile vedere dalla figura 1.15, la differenza tra i due consiste nel fatto che nei primi i componenti da unire si sovrappongono, mentre nei giunti di testa viene utilizzato un ulteriore pezzo di materiale che faccia da ponte tra i due componenti.

In particolare nella figura sono mostrate le seguenti configurazioni:

- Sovrapposizione semplice (*single riveted lap-joint*);
- sovrapposizione doppia (*double riveted lap-joint*);
- doppio giunto di testa (*double riveted butt-joint*).

La resistenza di una giunzione rivettata è determinata dalla disposizione dei rivetti. Questa varia in funzione dell'applicazione, ma deve essere tale da non indebolire eccessivamente le lamiere, e garantire un adeguato numero di elementi di fissaggio.

1.4.1 Meccanismi di rottura

I meccanismi di rottura di una giunzione rivettata sono legati alla disposizione dei rivetti e ad un dimensionamento errato di questi. In particolare, possiamo dividere le modalità di cedimento in due categorie: cedimento del rivetto, cedimento delle lamiere. Infatti, un giunto con troppi rivetti porterà al cedimento in corrispondenza dei fori della lamiera, mentre un giunto con troppi pochi fori causerà la rottura del rivetto.

Tra i meccanismi di cedimento del rivetto abbiamo il taglio del rivetto (figura 1.16) e lo schiacciamento, quindi il rivetto non resiste ai carichi presenti.

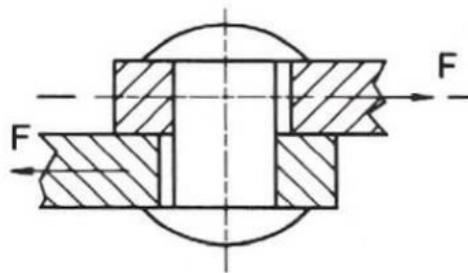


Figura 1.16: Giunto rivettato sollecitato a taglio [16].

Tra i meccanismi di cedimento delle lamiere possiamo avere ovalizzazione del foro (rifollamento), tranciamento delle lamiere e strappo delle lamiere. Il *rifollamento* si

verifica quando il rivetto è in grado di resistere alle sollecitazioni, mentre la lamiera cede provocando un'ovalizzazione del foro.

Il *tranciamento* si può verificare quando la sezione minima del giunto è sottoposta a carichi di taglio. Si ha il conseguente cedimento di tale sezione, in quanto la lamiera è stata precedentemente indebolita dalla presenza del foro per la sede del rivetto.

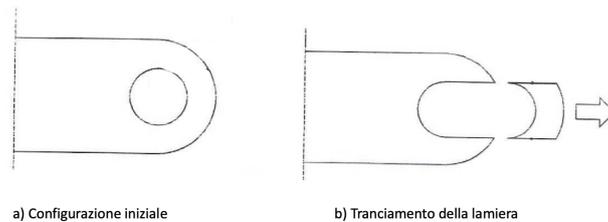


Figura 1.17: Lamiera per rivettatura che cede per tranciamento [16].

Le lamiere invece cedono a *strappo* quando sollecitati da carichi in direzione perpendicolare alla sezione di rottura.

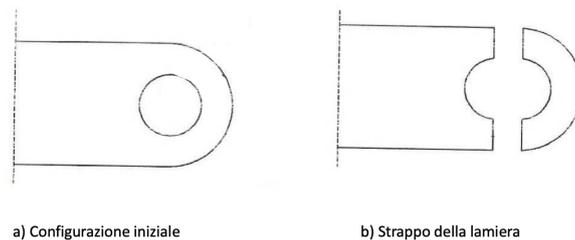


Figura 1.18: Lamiera per rivettatura che cede per strappo [16].

La condizione ideale di cedimento si verifica quando rivetto e lamiere cedono contemporaneamente, ovvero sono in grado di trasmettere gli stessi carichi. Questo si verifica con un buon dimensionamento della giunzione, tramite tabelle che forniscono il diametro del rivetto in funzione dello spessore delle lamiere da collegare.

1.4.2 Scelta del rivetto

Vi sono differenti tipologie di rivetti in commercio. La scelta del tipo di rivetto dipende dall'applicazione, ad esempio dai carichi di esercizio, dalle necessità di montaggio e dai materiali delle lamiere.

Le tipologie di rivetto più usate sono:

- Rivetto cieco (*pop rivet*): utilizzato spesso quando un lato della giunzione non è accessibile. Nell'industria automotive possono essere utilizzati per riparazioni strutturali, montaggio di coperture in plastica e altri accessori o per lavori specializzati di riparazione della carrozzeria [17].
- rivetto guida: è una tipo di rivetto cieco, viene piantato con un martello che ne svasa l'estremità inserita nel foro.
- rivetto a frizione: anche esso è un tipo di rivetto cieco. È il primo ad essere utilizzato per la riparazione di aeromobili.
- rivetto a filo: anche chiamati rivetti svasati per la presenza di una testa e un foro svasati. Vengono utilizzati nelle applicazioni da esterni [14].
- Rivetto autopercorante: presenta uno stelo tubolare. A differenza delle altre tipologie di fissaggio, il rivetto si espande nella lamiera inferiore senza perforarla, generando di conseguenza un bloccaggio meccanico [18].
- Rivetto solido: è il rivetto più antico. Utilizzato specialmente nell'industria aerospaziale, è presente in vari materiali e dimensioni. Durante l'installazione le sue dimensioni si modificano: l'area della sezione trasversale del rivetto aumenta, fino a riempire tutto il pre-foro, e con essa aumenta la resistenza alla compressione ed al taglio [19].
- Rivetto strutturale in acciaio: utilizzato per unire acciai per applicazioni strutturali.



Figura 1.19: Alcuni tipi di rivetti: a) rivetto autopercorante; b) rivetto guida; c) rivetto solido.

Dopo aver stabilito il tipo di rivetto adatto per la specifica applicazione, si utilizzano delle tabelle per il dimensionamento del rivetto.

1.4.3 Applicazione del rivetto

Il processo di fissaggio del rivetto varia da un tipo di rivetto all'altro.

Alcuni rivetti richiedono una perforazione delle lamiere, come i rivetti pieni e i rivetti ciechi, altri invece non richiedono fori, come i rivetti autoperforanti (SPR).

La realizzazione del pre-foro può causare bave, se non rimosse, possono impedire il corretto montaggio dei componenti. I rivetti autoperforanti (SPR) sono progettati per perforare i pannelli e diffondersi verso l'esterno.

Inoltre, alcuni rivetti sono progettati per essere compressi a una velocità specificata utilizzando uno strumento specifico. In questo modo il corpo del rivetto si deforma garantendo il bloccaggio dei componenti. Tuttavia, se compresso troppo velocemente, si possono creare dei vuoti o il metallo può indurirsi e causare il cedimento del rivetto nel tempo, causando un potenziale guasto [20].

1.4.4 Vantaggi e svantaggi

I principali vantaggi di questo tipo di giunzione riguardano la possibilità di mantenere inalterata la struttura e la resistenza del materiale (stabilità della giunzione) o la possibilità di accoppiare parti di diverso spessore o di materiale differenti. Tramite la rivettatura è possibile infatti unire diversi materiali, metallici o non metallici, materiali verniciati o rivestiti e materiali compositi. Il processo di rivettatura presenta anche il vantaggio di essere molto economico, paragonato alle altre tecnologie di giunzione, prevede un'esecuzione rapida ed è versatile. A differenza della saldatura, inoltre, il processo di rivettatura può ritenersi ecologico, in quanto non vengono generati fumi o scintille, ma anche meno dispendioso dal punto di vista energetico dei macchinari utilizzati.

La rivettatura però presenta anche degli svantaggi, legati in primo luogo alla necessità di forare le lamiere. Le cause sono un indebilimento delle lamiere e una concentrazione delle tensioni in prossimità dei fori (si ricorda il paragrafo 1.3.4). Infine, un ulteriore svantaggio è la non smontabilità della giunzione, se non per distruzione del rivetto.

1.4.5 Pop rivet

Questa tipologia di rivetti sono utilizzati nei provini realizzati in questo studio di tesi.

Il pop rivet è costituito da due parti, il rivetto vero e proprio e il mandrino (figura 1.20). Il rivetto è formato a sua volta da una testa e uno stelo, in questo caso tubolare e generalmente in alluminio, invece il mandrino presenta uno stelo ed una testa che fuoriesce dal rivetto. Sotto la testa del rivetto, vi è una sezione del mandrino a diametro inferiore, utile per il processo di fissaggio.

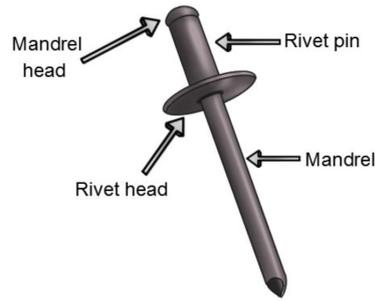


Figura 1.20: Configurazione di un rivetto pop: testa del rivetto (*rivet head*), stelo del rivetto *rivet pin*), testa del mandrino *mandrel head*) e corpo del mandrino *mandrel*) [21].

Per la realizzazione di una giunzione rivettata con i pop rivet, il mandrino viene inserito all'interno della rivettatrice. A seguito del posizionamento del rivetto nel pre-foro delle lamiere (figura 1.21 a.), il mandrino viene tirato attraverso lo stelo del rivetto. In questo modo la testa del mandrino, di diametro maggiore dello stelo, causa la deformazione del rivetto che rimane così bloccato saldamente contro la superficie del materiale. Il processo di fissaggio termina quando il mandrino si rompe in corrispondenza del punto a sezione ridotta (figura 1.21 b.).

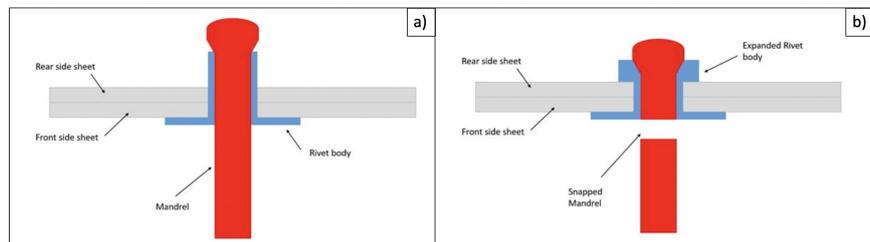


Figura 1.21: Sezione di un giunto rivettato durante le fasi del processo di fissaggio: a) posizionamento del rivetto all'interno del pre-foro, b) deformazione del rivetto e rottura del mandrino[22]

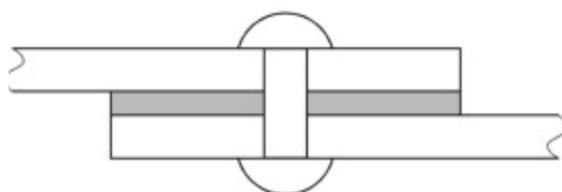
Capitolo 2

Stato dell'arte

2.1 Rivet-bonding

Rivet-bonding è una tecnica di giunzione ibrida che combina la rivettatura con l'incollaggio mediante adesivi. La tecnologia rivet-bonding è sempre più utilizzata nell'industria automotive, in quanto consente un miglioramento della qualità e la resistenza delle giunzioni [23]. In particolare, viene utilizzata quando alcuni requisiti non possono essere ottenuti da un'unica tecnologia di giunzione. I possibili requisiti non riguardano esclusivamente la resistenza meccanica della giunzione, ma anche il costo o la fattibilità in generale [24].

Un esempio di una giunzione rivet-bonding è mostrata in figura 2.1. È possibile riconoscere le due lamiere da assemblare, tra di esse l'adesivo e, infine, un rivetto centrale.



Rivet-bonded joint

Figura 2.1: Sezione di una giunzione incollata rivettata.

In letteratura si trovano pochi lavori di ricerca sull'analisi dei giunti rivettati incollati. Per citare qualche esempio Hoffer [25] ha determinato la capacità portante di un giunto rivettato testando statisticamente i giunti e valutando il tipo di rottura del giunto. Fung [26] ha costruito un modello agli elementi finiti per giunti singoli rivettati a scatto e svasati, ed è riuscito ad esaminare le interazioni tra rivetti

e componenti assemblati, determinando inoltre i fattori di concentrazione delle sollecitazioni. Ali M.Al-Samhan [27], sfruttando l'analisi agli elementi finiti, valuta l'effetto dell'orientamento, del tipo e dello spessore dell'adesivo sulle sollecitazioni sviluppate nei giunti rivet bonding. Sadowski [28] ha valutato l'influenza della geometria del lay-out dei rivetti sul carico meccanico dei giunti ibridi incollati rivettati.

2.1.1 Realizzazione della giunzione

Per la realizzazione di una giunzione incollata rivettata, inizialmente viene applicato prima l'adesivo, che può essere sottoforma di pellicola o in pasta. In seguito si applica il rivetto, secondo quanto visto nel paragrafo 1.4.3 e 1.4.5.

Da notare che la presenza dell'adesivo non altera la modalità di inserimento del rivetto. Potrebbero avere un'influenza invece sui parametri di impostazione richiesti per l'applicazione del fissaggio meccanico [29].

Infine, per completare la realizzazione della giunzione, si ha l'indurimento dell'adesivo.

2.1.2 Vantaggi e svantaggi

Rispetto ai giunti realizzati con una singola tecnica, o rivettatura o incollaggio, la rivet bonding fornisce numerosi vantaggi. Innanzitutto, generalmente si verifica un aumento della resistenza. Infatti, ricordando i paragrafi 1.3 e 1.4, l'adesivo sopporta un carico maggiore in trazione e taglio, mentre i rivetti impediscono il verificarsi di spellature (*peeling*) [23].

Inoltre, si ha la realizzazione di un giunto continuo e a tenuta (grazie alla presenza dell'adesivo) [29].

Rispetto alle altre tecnologie ibride, invece, l'utilizzo di un fissaggio meccanico permette la giunzione di tanti materiali, tra cui materiali plastici o preverniciati [30].

Tuttavia, bisogna tenere in conto di alcuni svantaggi nell'utilizzo della tecnica di giunzione ibrida rivet-bonding [29]:

- tempi di lavorazione lunghi paragonati ad una sola rivettatura autoperforante;
- possibile contaminazione degli utensili di rivettatura;
- necessità di tempi ciclo aggiuntivi per la preparazione e pulizia delle superfici, utile per garantire una buona adesione;
- distribuzione delle pressioni dell'adesivo disomogenea, a causa dalla rivettatura.

2.2 Stato dell'arte in CRF

Il Centro Ricerche Fiat (CRF) si occupa attivamente della fase di sperimentazione, sia per quanto riguarda l'analisi e la fattibilità di soluzioni innovative, sia per la verifica e l'analisi di situazioni attuali.

Questo lavoro di tesi approfondisce il primo studio delle giunzioni ibride acciaio alluminio, effettuato in azienda nel corso dell'anno 2020. Lo studio precedente analizza le dilatazioni termiche in due profilati costituiti da lamiera in alluminio e una lamiera in acciaio alto resistenziale. Gli spessori delle lamiere sono riportati in tabella 2.1

Acciaio	2 mm
Alluminio	2,5 mm
Alluminio	1,45 mm

Tabella 2.1: Spessori delle lamiere utilizzate nei provini studio del CRF.

Il profilato presenta una lunghezza di circa 1,5 m, mentre la sezione è mostrata in figura 2.2



Figura 2.2: Sezione dei profilati studiati in GML.

Per ottenere tale forma delle lamiere, queste sono state piegate con una piegatrice pneumatica. Successivamente le lamiere sono state prima forate, per realizzare la sede del rivetto, e poi incollate. L'adesivo è stato applicato alle interfacce dei materiali, sia tra le due lamiere in alluminio, che tra il materiale in acciaio e un alluminio, in modo da evitare il fenomeno della corrosione galvanica. In particolare in un profilato è stato utilizzato l'adesivo *Betamate 1822* e in un secondo profilato l'adesivo *Sikapower 533 MBX*, entrambi adesivi specifici per i giunti ibridi.

La tipologia di rivetto utilizzata, invece, è un pop rivet di diametro 6 mm, posto ad un passo di 210 mm.

I provini sono stati sottoposti ad una temperatura superiore i 160°C, simulando il processo di cottura cataforesi. È stato verificato che, con questa configurazione, le deformazioni differenziate delle lamiere sono compensate dall'azione dell'adesivo. Perciò i profilati non presentano il fenomeno del festonamento, garantendo la buon riuscita di tale giunzione.

Nonostante la buona riuscita di questo campione, l'azienda sta continuando, con tale studio di tesi, ad analizzare ulteriori configurazioni di giunzioni ibride. In particolare risulta essere di interesse aziendale la valutazione delle dilatazioni acciaio-alluminio in giunti di forma e dimensione differenti al caso precedente, e con diverse tipologie di adesivi.

2.3 Nuovi materiali metallici nel settore automotive

Durante la metà del 1980 si assiste ad uno spiccato interesse nella ricerca di nuovi materiali per l'industria *automotive* [12]. I nuovi materiali riguardano sia metalli, leghe di alluminio, acciaio ad alta resistenza e leghe di magnesio, sia materiali plastici e compositi.

La ricerca di nuovi materiali, e di conseguenza di nuovi metodi di giunzione, risulta essere ancora attuale. Soffermandoci sui nuovi materiali metallici, questi consentono di migliorare l'efficienza del veicolo riducendone la massa, garantendo comunque i requisiti richiesti in termini di sicurezza passeggeri e un prezzo finale del veicolo competitivo.

2.3.1 Acciai ad alta resistenza

Gli acciai alto resistenziali AHSS (*Advanced High Strength Steels*) rappresentano un'innovazione nel campo degli acciai.

Alcuni tipi di acciaio alto resistenziali sono i *dual-phase* (DP), *transformation-induced plasticity* (TRIP), *high-strength low-alloy* (HSLA), *complex-phase* (CP), *twinning-induced plasticity* (TWIP) e acciai martensitici.

Come è possibile vedere dalla figura 2.3, tutte queste tipologie di AHSS sono caratterizzate da un'elevata resistenza e duttilità. Queste caratteristiche permettono di pensare di realizzare dei componenti più leggeri adottando delle sezioni più sottili, ma potendo migliorare la resistenza e le altre proprietà richieste in termini di *performance* del veicolo [31]. Si stima che gli AHSS potrebbero assicurare una riduzione del peso di circa il 25% [1].

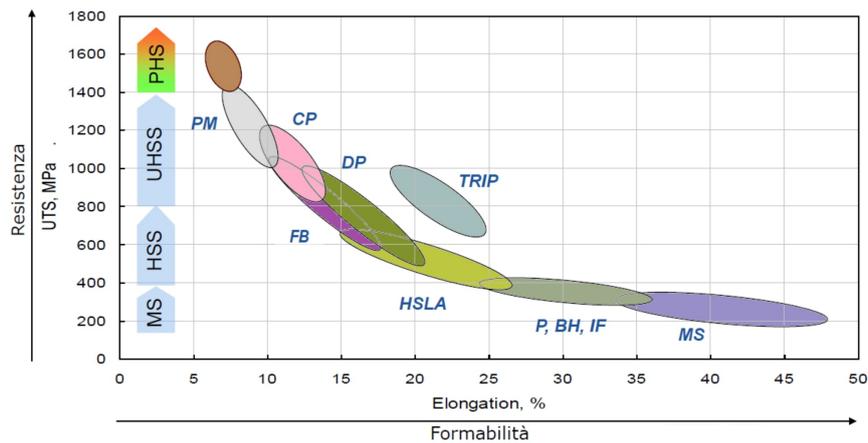


Figura 2.3: Diagramma carico di snervamento in funzione dell'allungamento per alcuni tipi di acciai.

La differenza tra i vari tipi di acciai ad alta resistenza è determinata dall'applicazione di trattamenti di miglioramento delle proprietà meccaniche: indurimento attraverso soluzioni solide di elementi, precipitazione e trattamenti termici. Ad esempio il miglioramento delle caratteristiche meccaniche del DP è ottenuto mediante i trattamenti termici di ricottura a temperature intercritiche e successiva tempra.

Dal punto di vista della produzione di componenti, risulta essere di fondamentale importanza la compatibilità degli acciai ad alta resistenza con i processi di produzione convenzionali.

L'acciaio viene solitamente utilizzato, nell'industria *automotive*, per il telaio e le chiusure.

2.3.2 Leghe di alluminio

Le leghe di alluminio vengono invece utilizzate per la fabbricazione di pezzi fusi per il treno motore, cofani, parafranghi anteriori, portiere, fascioni, cerchioni, componenti prodotti mediante fusione, estrusione e forgiatura.

L'introduzione dell'alluminio nell'industria *automotive* è in continuo aumento. Infatti, si passa da 50 kg di alluminio a veicolo nel 1990 ad oggi con 151 kg.

Studi condotti ritengono che il quantitativo di alluminio, per veicolo, potrebbe raggiungere i 196 kg entro il 2025 [32].

L'alluminio presenta una resistenza meccanica inferiore rispetto l'acciaio. Di conseguenza, in alcune applicazioni, è necessario aumentare lo spessore dei componenti per raggiungere le medesime caratteristiche meccaniche. Questo sarebbe peggiorativo dal punto di vista del peso del veicolo, ma la densità dell'alluminio è di 2.7 kg/m^3 , circa un terzo di quella dell'acciaio, e ciò consente di alleggerire notevolmente la struttura. Ricordiamo che un obiettivo dei costruttori di automobili è la riduzione in peso del veicolo, in quanto viene ridotta contestualmente l'emissione di CO_2 , riuscendo a soddisfare quindi i requisiti della normativa ambientale. Si stima che per i modelli specifici con telaio in alluminio la riduzione di peso è circa il 30-40% [32].

Capitolo 3

Introduzione alle prove

3.1 Introduzione

In questo capitolo verranno presentate le tipologie di materiali (lamiere, adesivi e rivetti) utilizzati per la realizzazione dei provini.

Le prove effettuate in tale studio si distinguono in due: prove di resistenza a distacco per taglio, e prove di dilatazione termica differenziata.

Le **prove di resistenza a distacco per taglio** a trazione, caratterizzano la resistenza al taglio dell'adesivo. L'obiettivo è, quindi, quello di verificare che l'adesivo utilizzato sia compatibile con i carichi previsti durante l'esercizio e con i materiali adottati.

Lo svolgimento di tale prova sarà conforme alla normativa 9.55712/03 dello standard aziendale.

Le **prove di dilatazione termica differenziata**, invece, caratterizzano l'intera giunzione. In particolare permettono di verificare, tramite una serie di misurazioni prima e dopo cottura in forno, che il componente non presenti dilatazioni termiche che potrebbero comprometterne la funzionalità.

3.2 Materiali utilizzati

I materiali utilizzati, salvo diversa indicazione, sono da considerarsi analoghi sia per le prove di resistenza a distacco per taglio, che per le prove di dilatazione termica. Ciò che cambia sono le dimensioni dei materiali (lamiere e adesivi) e le modalità di applicazione dell'adesivo.

3.2.1 Lamiere

I materiali utilizzati sono delle lamiere in acciaio e alluminio. La differenza tra le due prove consiste nella forma e dimensione delle lamiere. In particolare, per le prove di resistenza al distacco per taglio vengono utilizzati dei lamierini di dimensioni 100 x 25 mm, mentre per le altre prove delle lamiere 250 x 500 mm.

Gli spessori e tipologia di materiale sono riassunti nella tabella seguente:

Prove distacco per taglio	
Materiale	Spessore (mm)
Alluminio	2,50
Acciaio	2,00
Prove dilatazione termica	
Materiale	Spessore (mm)
Alluminio	1,30
Alluminio	1,60
Acciaio	1,2

Tabella 3.1: Materiali e spessori usati per la realizzazione dei provini in entrambe le prove.

3.2.2 Adesivi

Gli adesivi utilizzati sono adesivi strutturali epossidici monocomponenti:

- Betamate 1822;
- Betamate 4600;
- Betamate 1424.

L'adesivo *Betamate 1822* è specifico per giunti ibridi, quindi ci aspettiamo le migliori caratteristiche con il suo utilizzo. Tuttavia si è deciso di analizzare anche il comportamento di adesivi specifici per giunti in alluminio (*Betamate 4600*) e specifici per giunti in acciaio (*Betamate 1424*).

Gli adesivi precedentemente citati vengono utilizzati in entrambe le prove. La differenza risiede nelle modalità di applicazione. In particolare, per le prove di dilatazione termica differenziata, l'adesivo viene applicato sotto forma di cordolo di diametro 3 mm (continuo anche in prossimità dei rivetti). Nelle prove di resistenza al distacco per taglio invece, come indicato dalla normativa aziendale, viene spalmato in modo da garantire un'area di giunzione 100 x 12 mm.

3.2.3 Rivetti

I rivetti vengono utilizzati esclusivamente nelle prove di dilatazione termica differenziata. I rivetti scelti sono dei *pop rivet* di diametro 3 mm, mostrati in figura 3.1.



Figura 3.1: Tipologia di rivetti utilizzati per le prove di dilatazione termica differenziata

3.2.4 Altri materiali

I provini per le prove di resistenza a distacco per taglio, come da normativa, necessitano di un filo di rame di diametro 0,5 mm con forma a V (figura 3.2). Il filo di rame è necessario per garantire uno spessore uniforme dell'adesivo applicato, su tutta la sezione di interfaccia.



Figura 3.2: Filo di rame di diametro 0,5 mm e forma a V, utilizzato nei provini per le prove di resistenza a distacco per taglio.

3.3 Strumenti utilizzati

Gli strumenti e macchinari utilizzati nelle prove sono differenti per le prove di resistenza al distacco per taglio e per le prove di dilatazione termica differenziata.

Questi sono riportati nella tabella 3.2 seguente.

Prove distacco per taglio
Macchina di trazione Galdabini sun20 Camera umida per invecchiamento CTUS Camera per invecchiamento in nebbia salina Stufe
Prove dilatazione termica
pistola automatica per l'erogazione dell'adesivo calibro elettronico spessimetro stufe

Tabella 3.2: Altri macchinari utilizzati per le prove.

Parte II

Prove di resistenza al distacco per taglio

Capitolo 4

Attività preliminari

4.1 Metodo di realizzazione dei provini

Le modalità di preparazione, applicazione dell'adesivo e le tipologie di prove sono state ripetute analogamente per tutte e tre le tipologie di adesivo: Betamate 1822, Betamate 4600 e Betamate 1424.

Per ogni tipo di adesivo, sono stati realizzati 26 provini (tabella 4.1), secondo la modalità esposta nei paragrafi seguenti.

In particolare, alcuni provini sono stati utilizzati nelle prove di resistenza a temperatura ambiente, altri sono stati testati in condizioni di temperatura limite (-40°C e a 80°C), infine altri provini hanno effettuato dei cicli di invecchiamento termici e invecchiamenti in presenza di umidità (CTUS e nebbia salina), prima di essere sottoposti alle prove di resistenza al distacco per taglio.

Quantità	Condizione di prova	Invecchiamento
5	temperatura ambiente	
5	-40°C	
5	80°C	
5	temperatura ambiente	500 h in CTUS
5	temperatura ambiente	500 h in nebbia salina
5	temperatura ambiente	500 h in forno a 100°C

Tabella 4.1: Caratterizzazione dei provini impiegati nelle prove di resistenza a distacco per taglio

4.1.1 Preparazione delle lamiere

È stato scelto di utilizzare i lamierini, di dimensioni e materiale precedentemente esposto nel paragrafo 3.2.1, nelle prove così come sono. Non sono stati effettuati trattamenti di sgrassatura o di oliatura, in quanto gli adesivi strutturali non necessitano di particolari trattamenti. I provini nelle condizioni iniziali sono mostrati in figura 4.1.



Figura 4.1: Lamierini utilizzati nella realizzazione dei provini per le prove di resistenza a distacco per taglio: a sinistra acciaio, a destra alluminio.

Successivamente sui lamierini è stata segnata, con un tracciatore manuale, una linea a distanza 12 mm dal bordo (figura 4.2). Questa delimita l'area di interfaccia tra i due materiali, in cui sarà successivamente applicato l'adesivo.

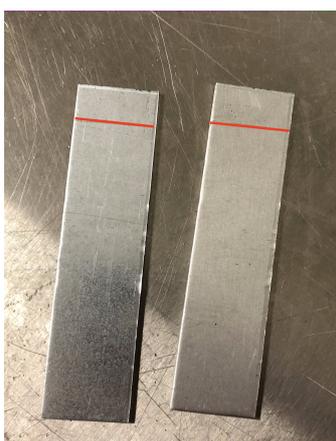


Figura 4.2: Lamierini con la traccia di 12 mm dal bordo.

4.1.2 Applicazione dell'adesivo

L'adesivo viene depositato nella zona di interfaccia, di dimensioni 25 x 12 mm. La sua applicazione è abbastanza semplice. Inizialmente è stata erogata, in modo manuale, una quantità di adesivo all'interno dell'area di interfaccia.



Figura 4.3: Esempio di applicazione dell'adesivo.

Per evitare che l'adesivo fosse presente in un'area di interfaccia superiore a quella prevista, è stato utilizzato un nastro nero che andrà rimosso al termine della procedura di preparazione dei provini.

Successivamente è stato posizionato centralmente un filo di rame (figura 4.4) in modo da garantire uno spessore costante dell'adesivo di 0,5 mm e, per completare la giunzione, è stato appoggiato un secondo lamierino. Durante quest'ultima operazione è necessario comprimere i lamierini in modo che l'adesivo si espande ricoprendo tutta l'area. La porzione di adesivo in eccesso, che deborda, è stata rimossa con una spatola.



Figura 4.4: Esempio di applicazione del filo di rame.

Infine, prima di procedere con le fasi successive, è stata inserita la giunzione tra una molletta di legno. Questo per evitare eventuali deformazioni dell'adesivo. Si scelgono le mollette in legno perché quelle in plastica fondono in cottura e le mollette di metallo si attaccano all'adesivo.

4.1.3 Cottura dei provini

La normativa aziendale stabilisce che, affinché avvenga la polimerizzazione dell'adesivo, bisogna raggiungere temperature di 160°C per 30 minuti. Questi valori di temperatura e tempo di cottura sono tipici della cottura cataforesi durante il ciclo di verniciatura. Di conseguenza i provini, precedentemente realizzati, sono stati cotti in forno rispettando le condizioni previste dalla normativa.

4.1.4 Invecchiamento

Parte dei provini, prima di effettuare la prova di resistenza a distacco per taglio, hanno subito differenti invecchiamenti. Questo perché i giunti incollati, durante la loro vita di servizio, possono essere esposti a varie condizioni di funzionamento. Le principali variabili delle condizioni ambientali sono la temperatura ed un'esposizione prolungata ad essa, l'umidità e la corrosione. È importante valutare come questi fattori possono influenzare le caratteristiche dell'adesivo.

I test di invecchiamento condotti, secondo la normativa interna aziendale 955712/03, sono i seguenti:

500 h in forno a 100°C Vengono destinati a tale invecchiamento 5 provini, per ogni tipo di adesivo.

500 h in nebbia salina Altri 5 provini, per ogni tipo di adesivo, vengono inseriti in una macchina di prova in nebbia salina. La nebbia salina viene utilizzata per verificare la corrosione dei materiali e di conseguenza valutare l'idoneità del rivestimento come protettivo dei campioni [33]. La camera per la prova di corrosione permette di mantenere costante la temperatura a 35°C e 95% di umidità relativa. Dopo il trascorrere del periodo di prova (in questo caso 500 ore) si assiste alla comparsa della ruggine.

500 h in CTUS Infine 5 provini sono destinati alle prove di corrosione in camera umida (CTUS). Tale invecchiamento permette la verifica dell'effetto delle condizioni ambiente, di temperatura e umidità, per 500 ore. La camera CTUS mantiene le condizioni di prova a 40°C e 98% di umidità relativa.

4.2 Metodo per prova di taglio a trazione

La prova di taglio a trazione è la più utilizzata per determinare la resistenza di giunti con una forza di legame medio-alta [34].

La prova, effettuata nei laboratori del CRF, prevede l'utilizzo di una macchina dinamometrica in modalità di trazione. Il provino è stato bloccato tra due ganasce

autobloccanti, disposte una nella traversa superiore e una nella traversa inferiore. Le ganasce esercitano una forza bloccante sul campione di 50 kN. La prova è stata condotta con una velocità costante di movimento delle traverse (12 mm/s), come stabilito dalla normativa interna aziendale. In particolare, le traverse si allontanano e i substrati del provino sono sottoposti ad un carico longitudinale che determinano la forza di taglio nella direzione del giunto.

La prova termina con la rottura della giunzione.

4.2.1 Trazione condizionata in temperatura

Gli adesivi adoperati nel veicolo vengono progettati per garantirne il funzionamento in condizioni di temperature comprese tra i -40°C e 80°C , valori limiti tra tutte le aree geografiche. Di conseguenza, le prove di resistenza a distacco per taglio dell'adesivo previste dalla normativa aziendale prendono in considerazione la presenza delle temperature limite, massimo e minimo.

La prova di trazione condizionata in temperatura è stata effettuata con l'utilizzo di una cella climatica, sia per simulare la temperatura più calda sia la temperatura più fredda. Il provino è stato posizionato all'interno della cella climatica, tra due ganasce come nel caso precedente. Tuttavia le ganasce che sono state utilizzate durante tali prove sono autobloccanti, ma sfruttano il meccanismo di una molla. La scelta è stata determinata dagli ingombri delle ganasce autobloccanti, che non permettevano il loro posizionamento all'interno della cella.

Le ganasce a molla che sono state utilizzate non influenzano la resistenza al distacco dell'adesivo. Tuttavia, osservando i grafici di risposta, si assiste ad una maggiore corsa della traversa rispetto al caso delle ganasce autobloccanti, dovuto ad un assestamento del precarico delle molle.

Capitolo 5

Svolgimento

5.1 Obiettivo

L'obiettivo di tali prove è la valutazione della resistenza al distacco per taglio dell'adesivo in una data applicazione, tramite l'utilizzo di una macchina di trazione.

I provini testati, sono stati precedentemente cotti in forno per la polimerizzazione dell'adesivo (paragrafo 4.1.3) e parte di essi hanno successivamente subito degli invecchiamenti. In questo modo è possibile capire se alcune condizioni di invecchiamento influenzano, positivamente o negativamente, la resistenza degli adesivi applicati.

Affinchè il campione sia ritenuto idoneo, è necessario che la sua tensione di rottura superi i valori minimi previsti dalla normativa interna aziendale (ad esempio 12 N/mm^2 per la trazione a temperatura ambiente). Se ciò è verificato, allora l'adesivo risulta essere compatibile con i carichi di esercizio e i materiali della giunzione, e potrà essere utilizzato in applicazioni successive. In caso contrario, l'adesivo non è compatibile con i materiali e non potrà essere utilizzato con essi.

5.2 Caso studio: Betamate 1822

Di seguito vengono esposte le prove e risultati dei 30 provini realizzati con l'adesivo Betamate 1822, specifico per i giunti ibridi.

Alcune serie di prove vengono condotte a temperatura ambiente, mentre altre a -40°C e $+80^\circ\text{C}$, come esposto in tabella 5.1.

Condizione di prova	Invecchiamento	Quantità
Temperatura ambiente (TA)		5
TA	500 h a 100°C	5
TA	500 h in NS	5
TA	500 h in CTUS	5
-40°C		5
80°C		5

Tabella 5.1: Serie di prove di resistenza a distacco per taglio

5.2.1 Temperatura ambiente senza invecchiamento

Cinque campioni precedentemente realizzati, sono stati testati nella macchina di trazione a temperatura ambiente, senza aver effettuato invecchiamenti.

Saranno di seguito mostrati i grafici di risposta dei provini (figura 5.1), in funzione del carico e della corsa della traversa, a parità di sezione di interfaccia dei substrati.

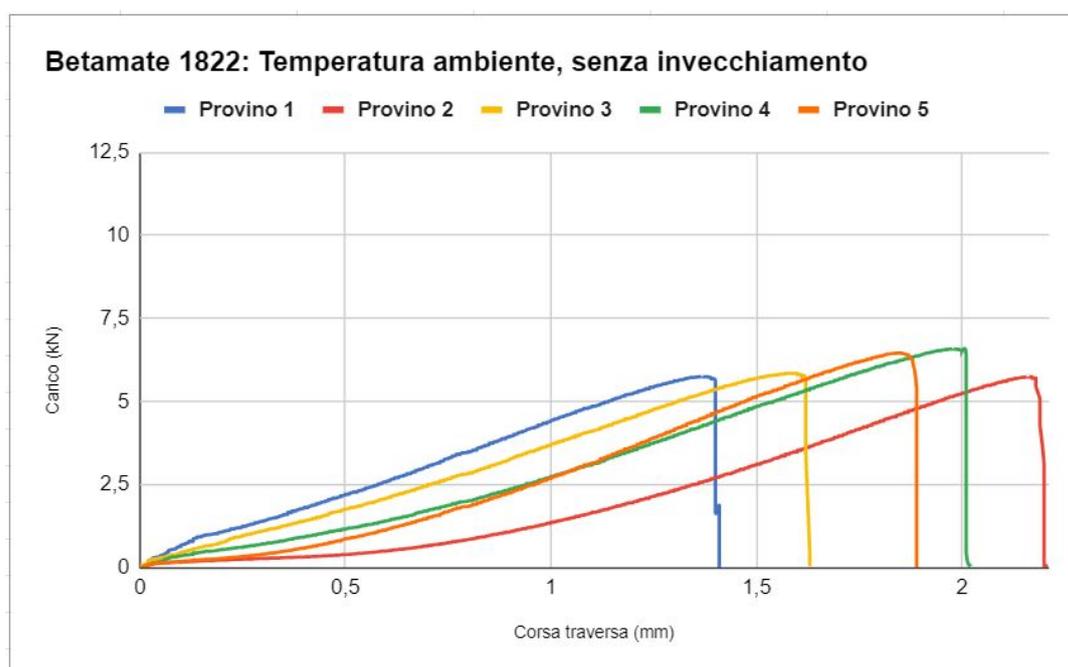


Figura 5.1: Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 a temperatura ambiente

Nella tabella 5.2 sono stati raccolti i dati più significativi per ogni campione: il

carico massimo raggiunto a rottura e tensione di rottura. Quest'ultima è stata ottenuta dividendo il valore del carico massimo per la sezione dei substrati considerata (25x12 mm).

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	5,75	19,15
2	6,45	21,50
3	5,74	19,15
4	5,85	19,49
5	6,58	21,93

Tabella 5.2: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura ambiente

Le immagini seguenti (figura 5.2) mostrano le superfici di frattura dei provini analizzati. È possibile notare come il cedimento sia prevalentemente un cedimento di tipo coesivo. Questo indica una buona interazione tra adesivo e substrato e, di conseguenza, un'ottimizzazione delle forze di coesione.

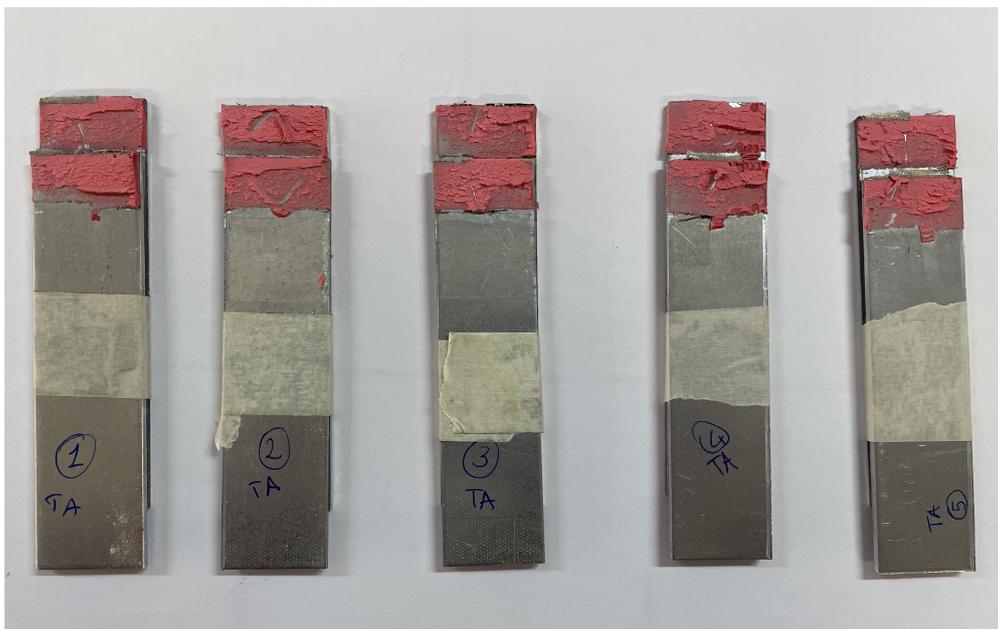


Figura 5.2: Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura ambiente

5.2.2 Temperatura ambiente con invecchiamento 500h a 100°C

Altri 5 campioni sono stati sottoposti a prova di taglio a trazione a temperatura ambiente, dopo aver effettuato l'invecchiamento di 500 ore a 100°C.

Di seguito sono mostrati i grafici di risposta dei provini (figura 5.3), sempre in funzione del carico e della corsa della traversa, a parità di sezione di interfaccia dei substrati.

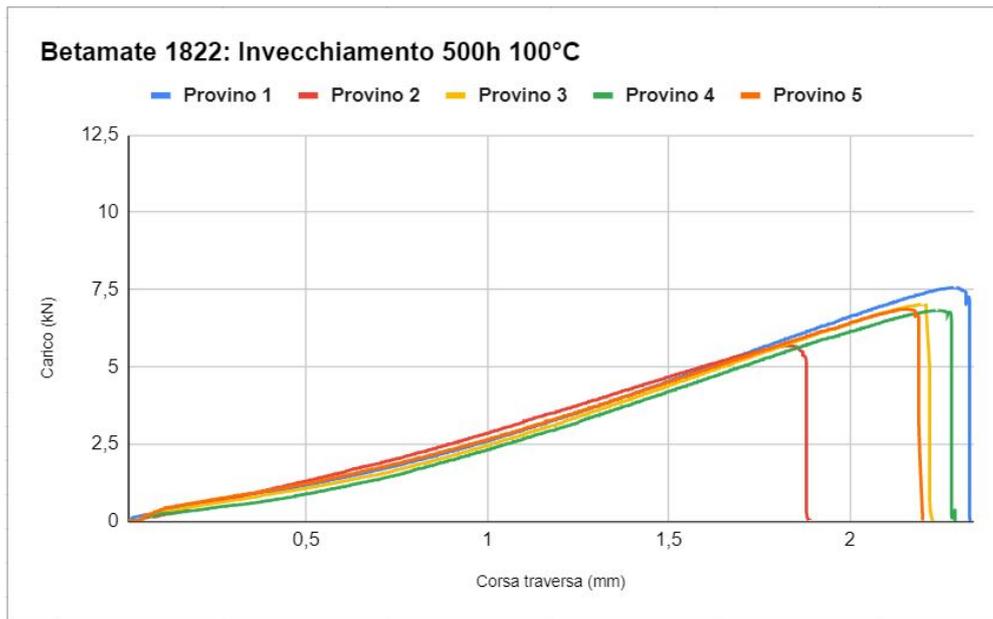


Figura 5.3: Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 e invecchiamento 500 ore a 100°C.

Nella tabella 5.3 sono mostrati il carico massimo raggiunto a rottura e tensione di rottura.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	7,56	25,21
2	5,68	18,92
3	7,01	23,35
4	6,82	22,74
5	6,87	22,89

Tabella 5.3: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura ambiente

L'immagine seguente (figura 5.4) mostra le superfici di frattura dei provini analizzati. Ancora una volta il cedimento è prevalentemente di tipo coesivo. Si assiste ad una zona di cedimento adesivo nel provino numero 2, spiegando così il carico di rottura più basso di tale campione.



Figura 5.4: Superfici di frattura dei campioni sottoposti ad invecchiamento di 500 ore a 100°C e prova di trazione a temperatura ambiente

5.2.3 Temperatura ambiente con invecchiamento 500h in nebbia salina

Altri cinque campioni hanno effettuato l'invecchiamento di 500 ore in camera nebbia salina e sono stati sottoposti a prova di taglio a trazione a temperatura ambiente.

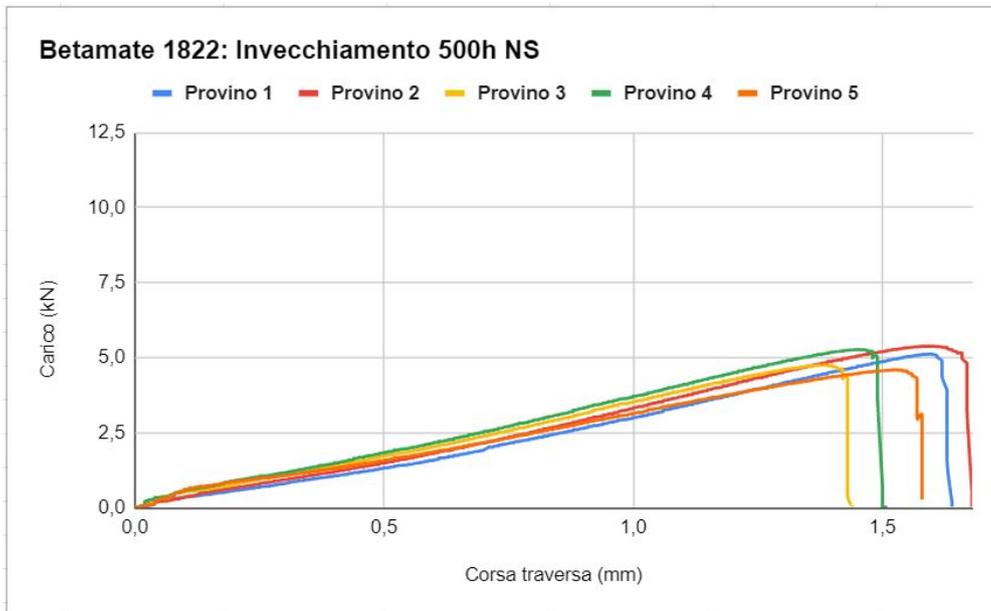


Figura 5.5: Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 e invecchiamento 500 ore in nebbia salina.

Ancora una volta sono mostrati gli andamenti di risposta dei provini (figura 5.5), in funzione della corsa della traversa e del carico, mentre in tabella 5.4 sono riassunti i valori del carico e tensione massima, prima della rottura.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	5,12	17,08
2	5,38	17,95
3	4,75	15,83
4	5,27	17,57
5	4,59	15,31

Tabella 5.4: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini, invecchiati in nebbia salina, sottoposti a trazione a temperatura ambiente

I valori di tensione di rottura sono molto simili tra i cinque provini. Il valore più basso ($15,31 MPa$) è riscontrato nel provino 5. Osservando le aree di frattura

(figura 5.6) possiamo notare che ciò può essere causato da una parziale zona di cedimento adesivo, visibile sul lato destro dell'interfaccia.

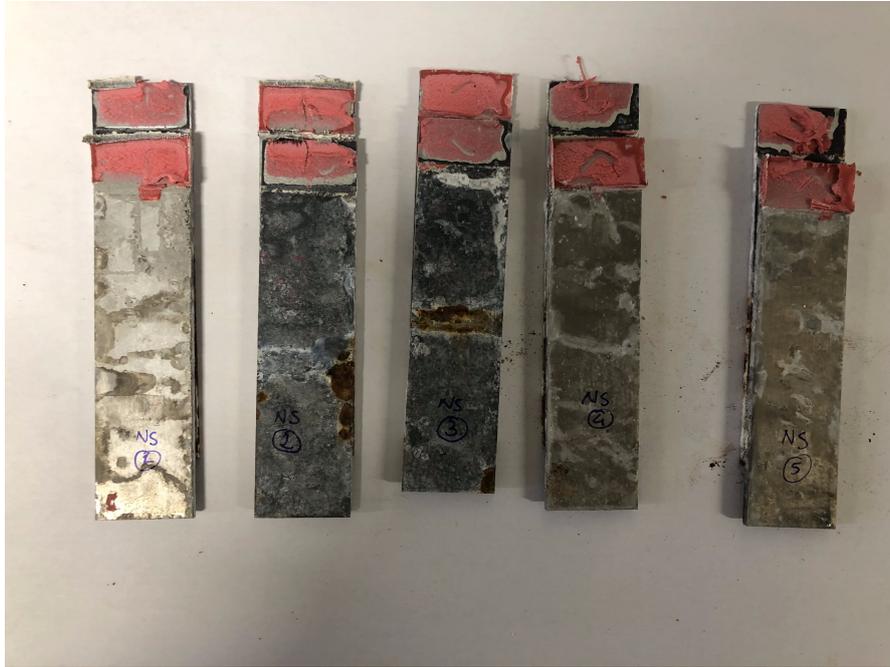


Figura 5.6: Superfici di frattura dei campioni sottoposti ad invecchiamento di 500 ore in nebbia salina, e prova di trazione a temperatura ambiente

5.2.4 Temperatura ambiente con invecchiamento 500h in CTUS

I seguenti provini hanno effettuato un ciclo di invecchiamento 500 ore in camera umida. In figura 5.7 è riportato il grafico di risposta dei provini, mentre in tabella 5.5 il carico e tensione massima raggiunta.

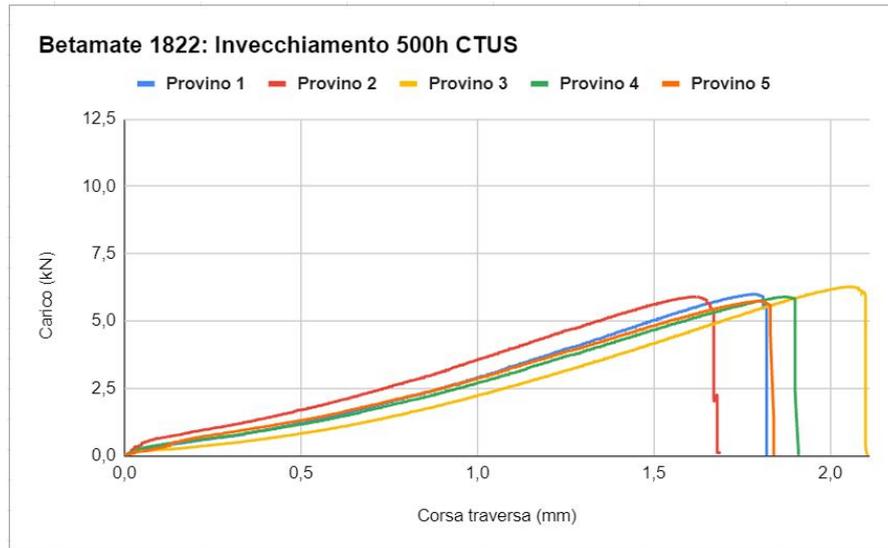


Figura 5.7: Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 e invecchiamento 500 ore in camera umida CTUS.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	5,99	19,97
2	5,90	19,66
3	6,26	20,88
4	5,90	19,65
5	5,73	19,11

Tabella 5.5: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini, invecchiati in CTUS, sottoposti a trazione a temperatura ambiente

I valori della tensione di rottura dei provini sono comparabili tra di loro. Infatti osservando le superfici di frattura (figura 5.8) è individuabile un cedimento di tipo coesivo, prevalentemente su tutti i provini.

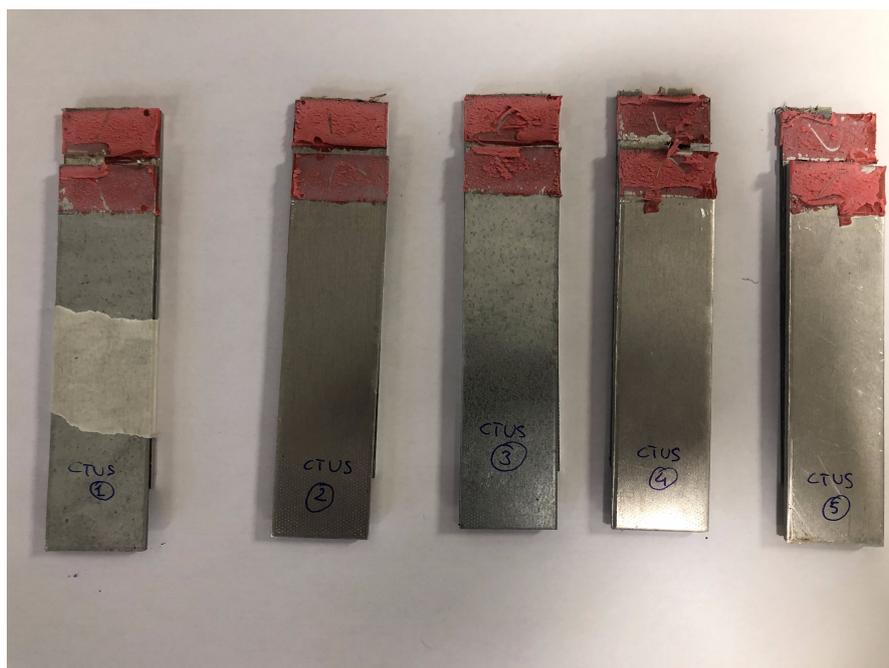


Figura 5.8: Superfici di frattura dei campioni sottoposti ad invecchiamento di 500 ore CTUS, e prova di trazione a temperatura ambiente

5.2.5 Temperatura di prova $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ senza invecchiamento

Alcuni provini sono stati destinati alle prove di taglio a trazione a temperatura di $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, senza aver precedentemente effettuato l'invecchiamento.

I grafici di risposta sono mostrati in figura 5.9, mentre le rispettive superfici di rottura in figura 5.10:

Infine, nella tabella 5.6 è possibile osservare i valori massimi del carico e tensione di rottura ottenuti per questi provini.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	6,94	23,13
2	9,32	31,08
3	9,33	31,11
4	9,00	30,00
5	7,72	25,72

Tabella 5.6: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini che hanno effettuato la prova di trazione a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

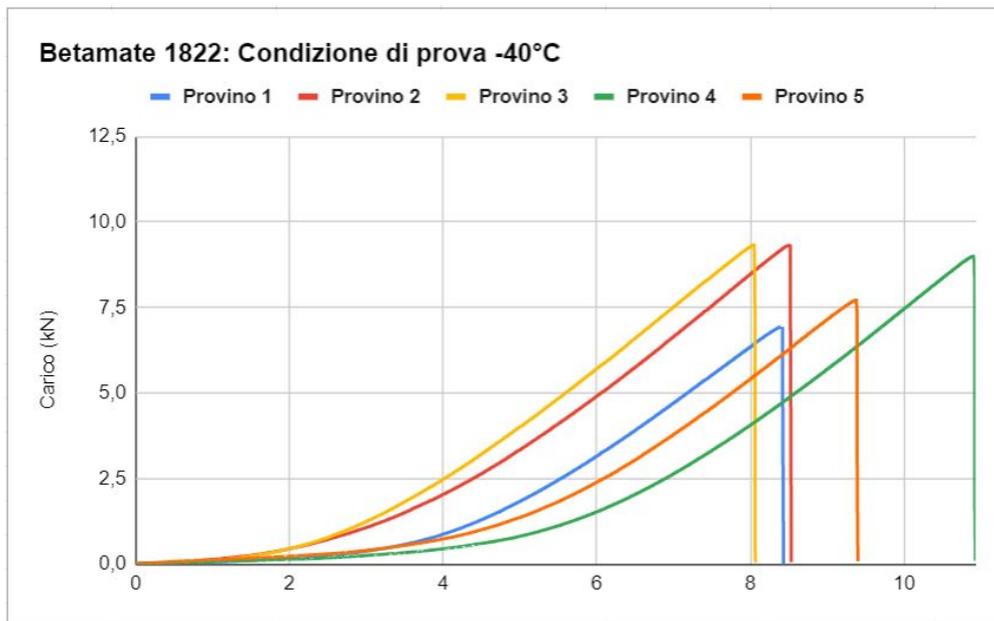


Figura 5.9: Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 e prova di trazione a -40°C .



Figura 5.10: Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura di -40°C .

5.2.6 Temperatura di prova 80°C senza invecchiamento

Per concludere la caratterizzazione della resistenza al distacco per taglio dell'adesivo specifico per i giunti ibridi, sono state effettuate delle prove di trazione alla temperatura di 80°C.

La tabella 5.7 mostra i valori carico e tensione massimi raggiunti dai provini.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	2,58	8,59
2	2,91	9,69
3	2,76	9,21
4	3,13	10,43
5	2,29	7,64

Tabella 5.7: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini che hanno effettuato la prova di trazione a 80°C.

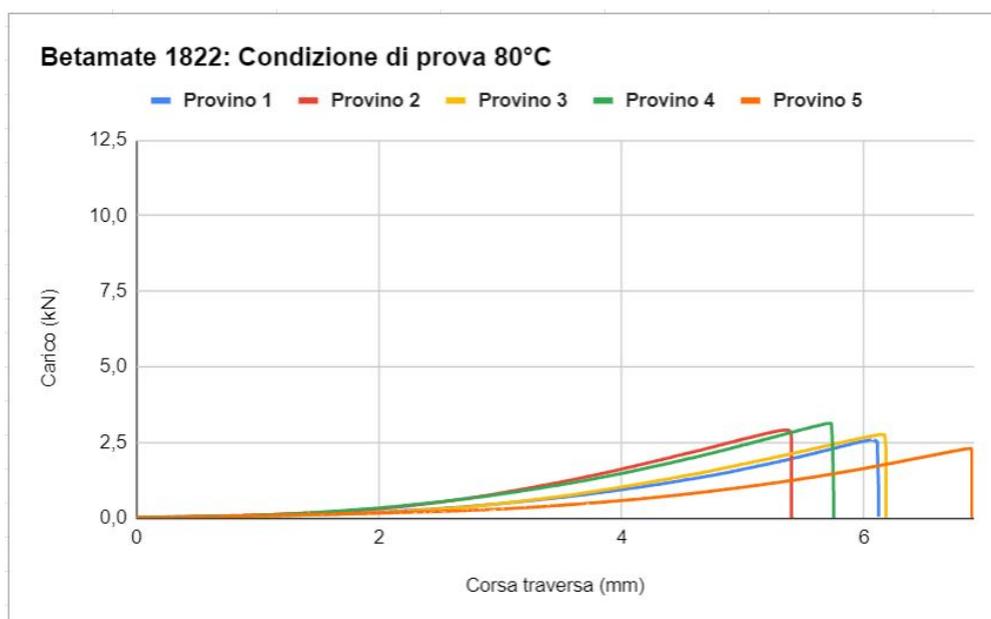


Figura 5.11: Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 e prova di trazione a 80°C.

I grafici di risposta sono mostrati in figura 5.11, mentre le rispettive superfici di rottura in figura 5.12.

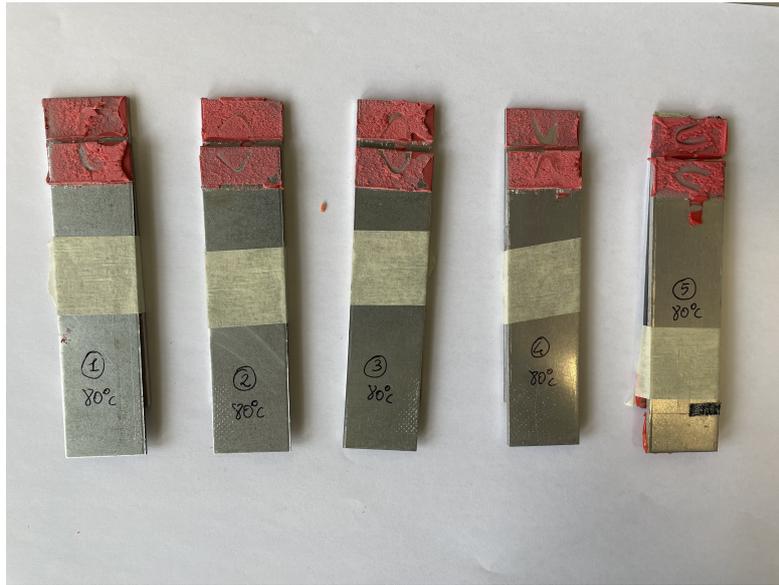


Figura 5.12: Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura di 80°C.

5.3 Caso studio: Betamate 4600

L'adesivo *Betamate 4600* è l'adesivo specifico per i giunti in alluminio. Sono stati realizzati 30 giunti acciaio-alluminio per prove di trazione a temperatura ambiente e in condizioni di temperatura, come riassunto in tabella 5.8.

Condizione di prova	Invecchiamento	Quantità
Temperatura ambiente (TA)		5
TA	500 h a 100°C	5
TA	500 h in NS	5
TA	500 h in CTUS	5
-40°C		5
80°C		5

Tabella 5.8: Serie di prove di resistenza a distacco per taglio

Le prove condotte sono analoghe ai casi precedenti, ma la tipologia differente di adesivo utilizzato mostra dei diversi risultati. Nei capitoli successivi saranno mostrati i risultati ottenuti nelle varie condizioni di prova.

5.3.1 Temperatura ambiente senza invecchiamento

Alcuni provini sono stati utilizzati nelle prove di trazione a temperatura ambiente, senza aver precedentemente subito alcun tipo di invecchiamento.

Di seguito sono mostrati i grafici di risposta dei provini, in funzione del carico e della corsa della traversa, a parità di sezione di interfaccia dei substrati (figura 5.13).

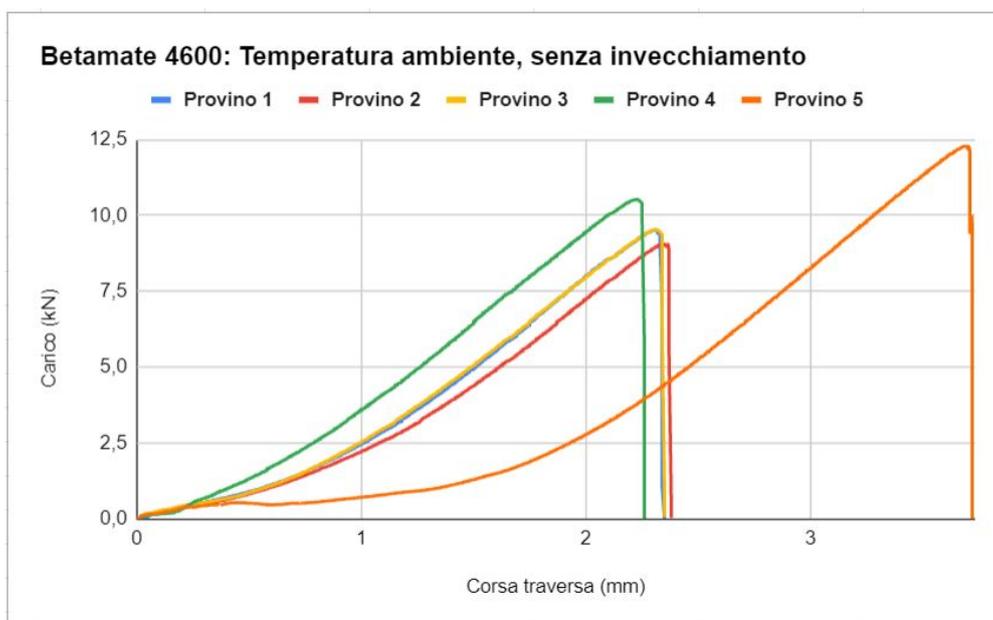


Figura 5.13: Andamenti carico-corsa per campioni trazionati a temperatura ambiente con Betamate 4600.

Nella tabella 5.9 sono stati riportati i dati più significativi per ogni campione, ovvero il carico massimo raggiunto a rottura e la tensione di rottura.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	9,53	31,76
2	9,06	30,19
3	9,53	31,78
4	10,53	35,1
5	12,29	40,96

Tabella 5.9: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura ambiente con adesivo specifico per giunti in alluminio

Le superfici di rottura sono mostrate in figura 5.14. Nonostante l'adesivo non è rotto perfettamente a metà, il tipo di cedimento può essere ritenuto prevalentemente coesivo, in quanto vi è sempre una patina di adesivo su entrambe le superfici degli aderendi.



Figura 5.14: Superfici di frattura dei campioni sottoposti alla prova di trazione a temperatura ambiente con adesivo specifico per giunti in alluminio

5.3.2 Temperatura ambiente con invecchiamento 500h a 100°C

I provini che hanno effettuato un invecchiamento termico per 500 ore a 100°C presentano dei grafici di risposta mostrati in figura 5.15.

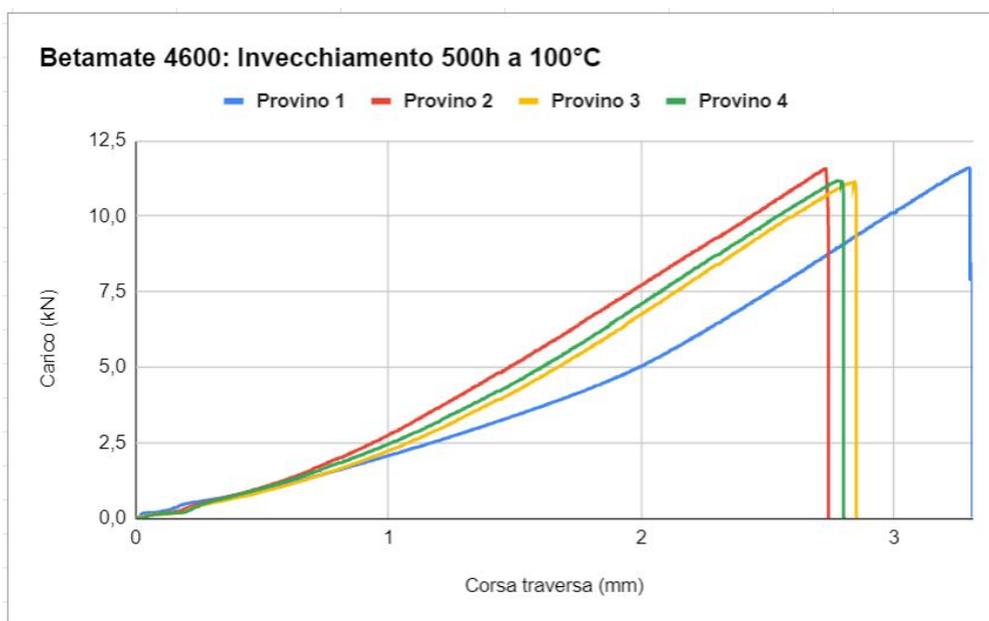


Figura 5.15: Andamenti carico-corsa per campioni invecchiati 500 ore a 100°C e trazionati a temperatura ambiente con Betamate 4600.

Nella tabella 5.10 sono stati riportati i dati più significativi per ogni campione.

Campione	Carico massimo (<i>kN</i>)	Tensione di rottura (<i>MPa</i>)
1	11,59	38,65
2	11,58	38,61
3	11,17	37,05
4	11,17	37,24
5	9,26	30,85

Tabella 5.10: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini con invecchiamento termico e sottoposti a trazione a temperatura ambiente.

Le superfici di rottura sono mostrate in figura 5.16. Nonostante l'adesivo non è rotto perfettamente a metà, il tipo di cedimento può essere ritenuto prevalentemente coesivo, in quanto vi è sempre una patina di adesivo su entrambe le superfici degli aderenti.

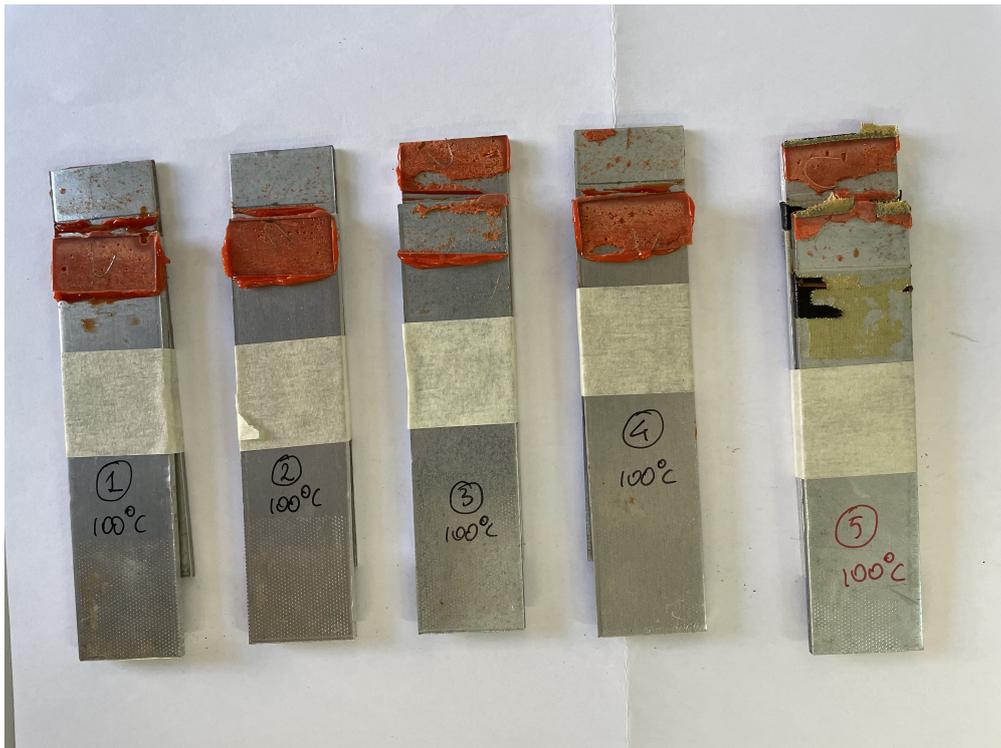


Figura 5.16: Superfici di frattura dei campioni invecchiati 500 ore a 100°C e sottoposti alla prova di trazione a temperatura ambiente

5.3.3 Temperatura ambiente con invecchiamento 500h in nebbia salina

Altri cinque provini hanno effettuato un ciclo di 500 ore in una camera di nebbia salina.

I valori massimi del carico di rottura e la tensione di rottura a taglio, sono i seguenti (tabella 5.11):

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	11,27	37,58
2	7,73	25,77
3	9,16	30,52
4	10,00	33,33
5	9,77	32,58

Tabella 5.11: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini con invecchiamento 500 ore in nebbia salina e sottoposti a trazione a temperatura ambiente.

È possibile notare come il secondo e terzo provino presentino delle tensioni sensibilmente minori. La motivazione di tale comportamento è deducibile osservando le figure di distacco (figura 5.18). Infatti entrambi i provini presentano delle zone di cedimento adesivo in prossimità del centro dell'interfaccia.

I grafici di risposta del provino alla prova di trazione sono mostrati in figura 5.18.



Figura 5.17: Superfici di frattura dei campioni invecchiati 500 ore in nebbia salina e sottoposti alla prova di trazione a temperatura ambiente con adesivo specifico per giunti in alluminio

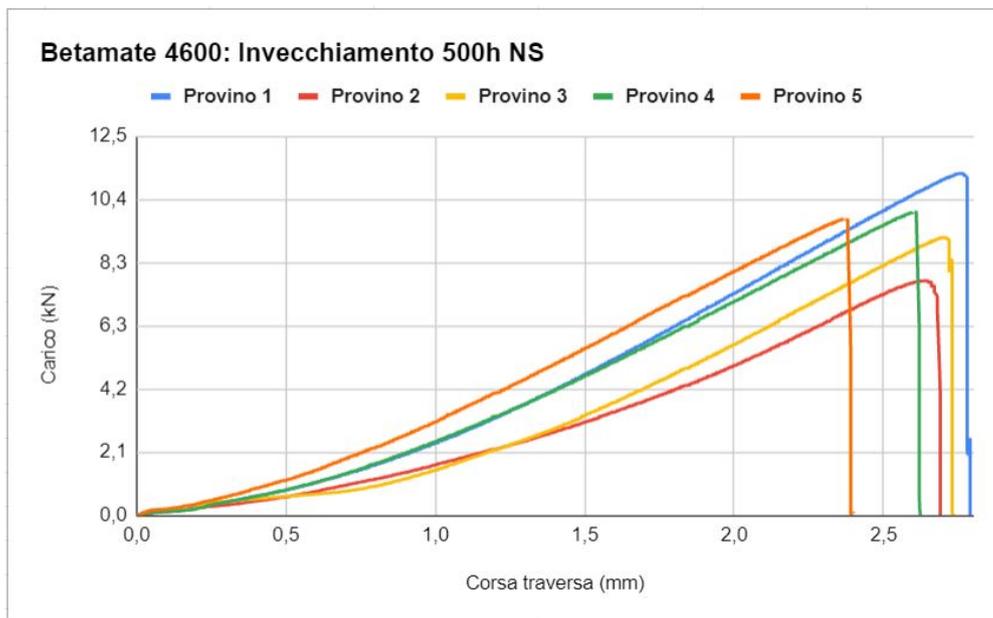


Figura 5.18: Andamenti carico-corsa per campioni invecchiati 500 ore in nebbia salina e trazionati a temperatura ambiente con Betamate 4600.

5.3.4 Temperatura ambiente con invecchiamento 500h in CTUS

Le prove di resistenza al distacco per taglio condotte sui provini che hanno subito un invecchiamento di 500 ore in camera umida mostrano i seguenti andamenti di figura 5.19.

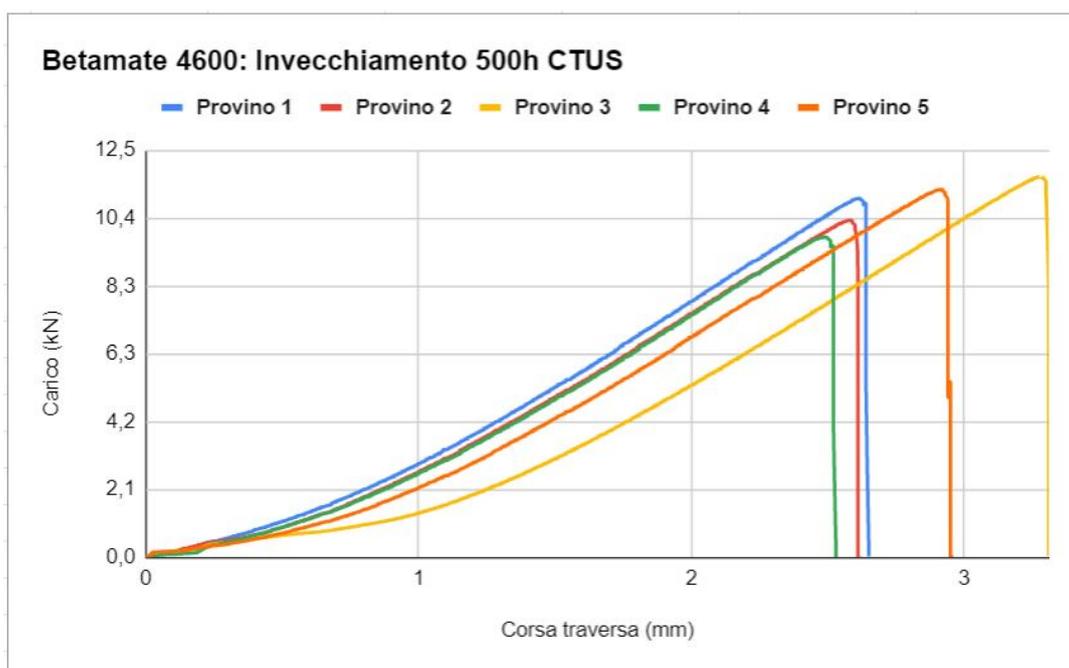


Figura 5.19: Andamenti carico-corsa per campioni invecchiati 500 ore in CTUS e trazionati a temperatura ambiente con Betamate 4600.

I valori massima di carico e tensione di rottura sono riportanti, per un più immediato confronto, nella tabella 5.12.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	11,02	36,74
2	10,35	34,50
3	11,69	38,95
4	9,83	32,77
5	11,29	37,65

Tabella 5.12: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini con invecchiamento 500 ore in CTUS e sottoposti a trazione a temperatura ambiente.

I valori ottenuti dalla prova sono tra di loro confrontabili e ne derivano delle superfici di frattura simili (immagine 5.20).



Figura 5.20: Superfici di frattura dei campioni invecchiati 500 ore in CTUS e sottoposti alla prova di trazione a temperatura ambiente con adesivo specifico per giunti in alluminio

5.3.5 Temperatura di prova -40 °C senza invecchiamento

Alcuni provini sono stati destinati alle prove di taglio a trazione a temperatura di -40°C, senza aver precedentemente effettuato l'invecchiamento.

I grafici di risposta ottenuti dalla macchina di trazione sono mostrati in figura 5.21.

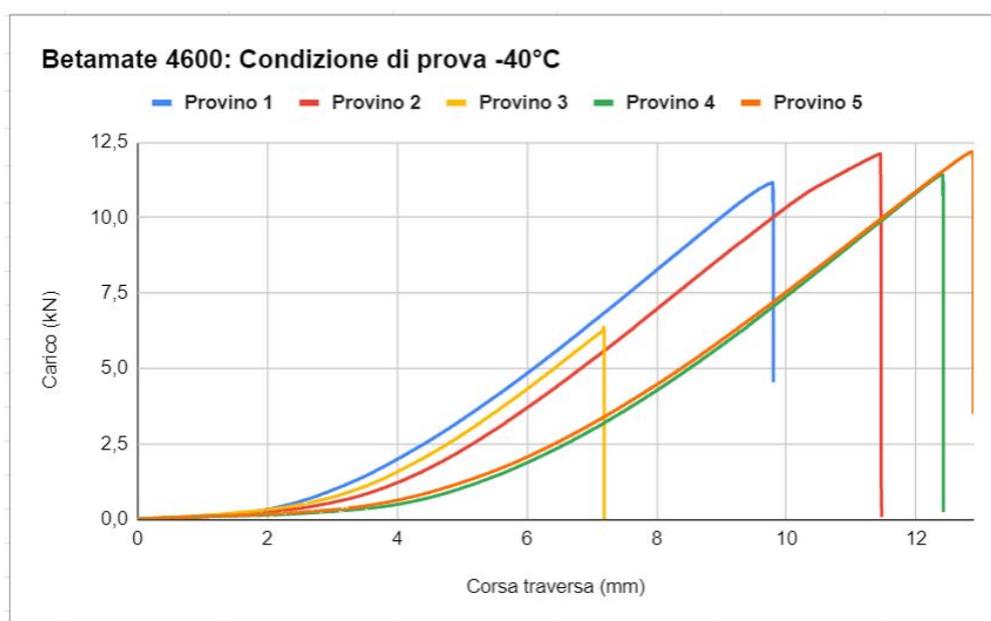


Figura 5.21: Andamenti carico-corsa per campioni di Betamate 4600 in prova condizionata in temperatura a -40°C.

I valori massimi del carico e della tensione di rottura sono riassunti nella seguente tabella 5.13.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	11,17	37,24
2	12,12	40,39
3	6,28	20,92
4	11,44	38,14
5	12,20	40,66

Tabella 5.13: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura -40°C.

Le superfici di rottura sono mostrate in figura 5.22.



Figura 5.22: Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura di -40°C .

5.3.6 Temperatura di prova 80°C senza invecchiamento

Infine, per concludere la caratterizzazione della resistenza al distacco per taglio dell'adesivo, sono state effettuate le prove di trazione alla temperatura di 80°C .

I grafici di risposta sono mostrati in figura 5.23, mentre le rispettive superfici di rottura in figura 5.24:

Infine nella tabella 5.14 sono riportati i valori massimi ottenuti del carico e tensione, a seguito della prova di trazione.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	7,04	23,46
2	6,69	22,30
3	8,35	27,84
4	7,29	24,29
5	4,44	14,79

Tabella 5.14: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura 80°C .

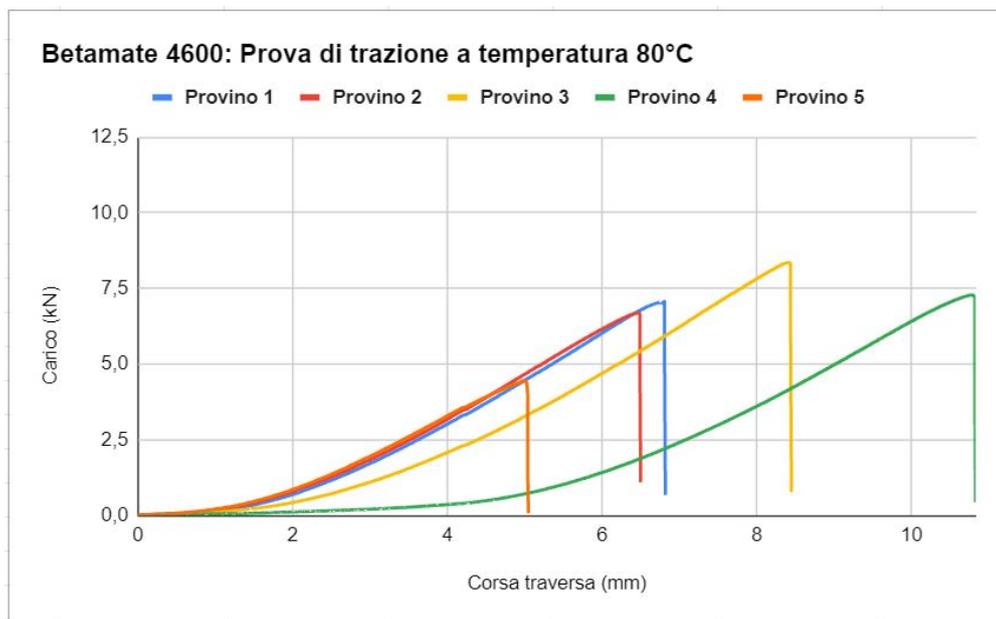


Figura 5.23: Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 4600 e prova di trazione a 80°C.



Figura 5.24: Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura di 80°C.

5.4 Caso studio: Betamate 1424

L'adesivo *Betamate 1424* è l'adesivo specifico per i giunti in acciaio. Sono stati realizzati 30 giunti acciaio-alluminio per prove di trazione a temperatura ambiente e in condizioni di temperatura, come riassunto in tabella 5.15.

Condizione di prova	Invecchiamento	Quantità
Temperatura ambiente (TA)		5
TA	500 h a 100°C	5
TA	500 h in NS	5
TA	500 h in CTUS	5
-40°C		5
80°C		5

Tabella 5.15: Serie di prove di resistenza a distacco per taglio

Le prove che sono state condotte sono analoghe ai casi precedenti, ma la tipologia differente di adesivo utilizzato mostra dei diversi risultati. Nei capitoli successivi saranno mostrati i risultati ottenuti nelle varie condizioni di prova.

5.4.1 Temperatura ambiente senza invecchiamento

I provini, trazionati a temperatura ambiente senza aver subito alcun processo di invecchiamento, hanno mostrato gli andamenti di risposta riportati in figura 5.25.

I valori massimi del carico e tensione di rottura, per una più facile comprensione, sono riassunti nella tabella 5.16.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	9,59	31,96
2	7,92	26,384
3	8,96	29,88
4	8,66	28,85
5	8,75	29,16

Tabella 5.16: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura ambiente.

È possibile notare come i valori di tensione massima sono abbastanza analoghi tra di loro. Ciò è riscontrato anche nelle superfici di rottura mostrate in figura 5.26

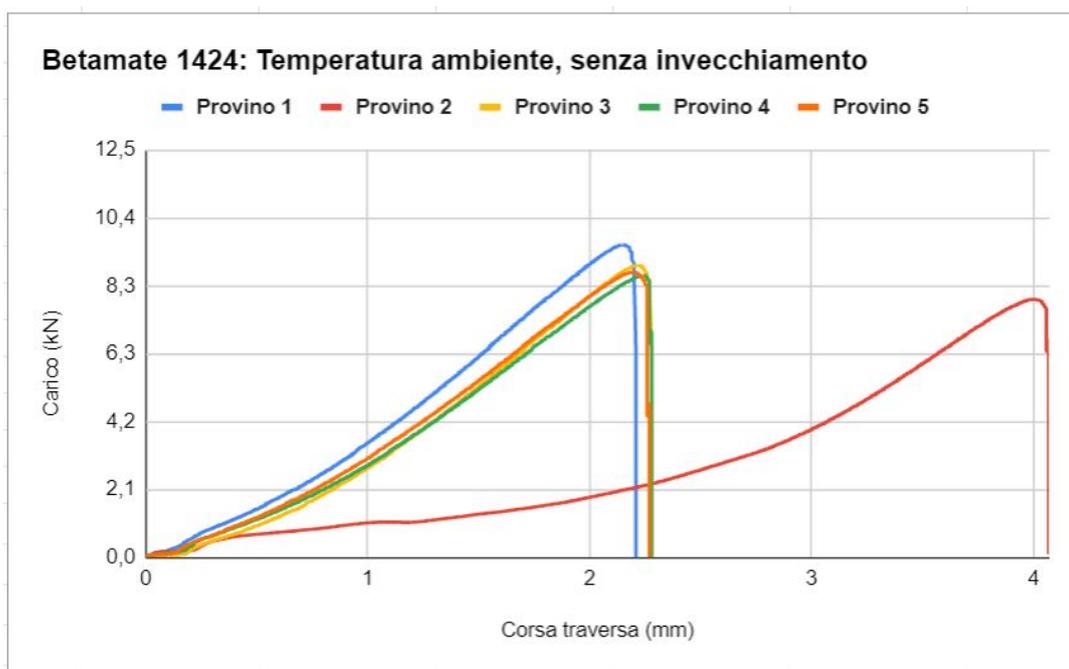


Figura 5.25: Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1424 e prova di trazione a temperatura ambiente.

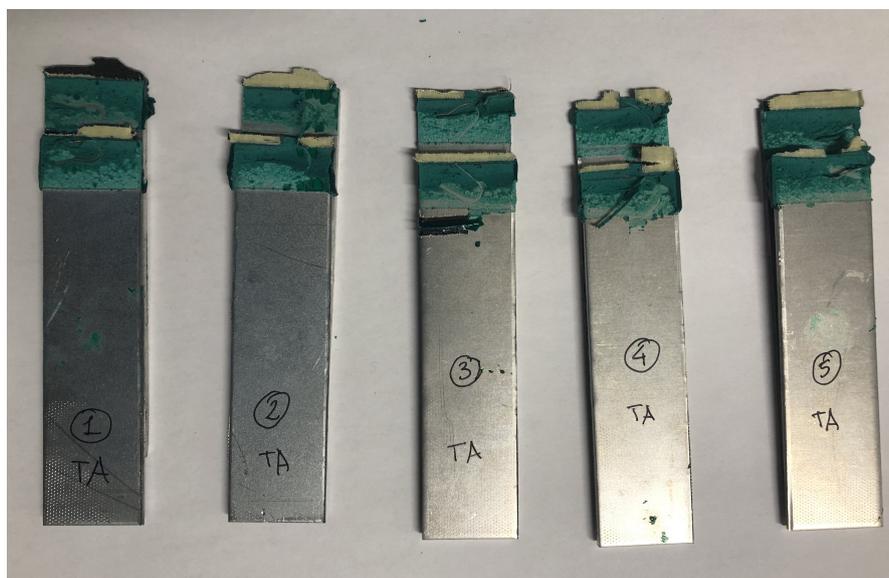


Figura 5.26: Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura ambiente.

5.4.2 Temperatura ambiente con invecchiamento 500h a 100°C

Alcuni provini hanno subito un ciclo di invecchiamento termico di 500 ore a 100°C. Successivamente sono stati sottoposti alla prova di trazione a temperatura ambiente.

Gli andamenti di risposta dei provini sono mostrati in figura 5.27.

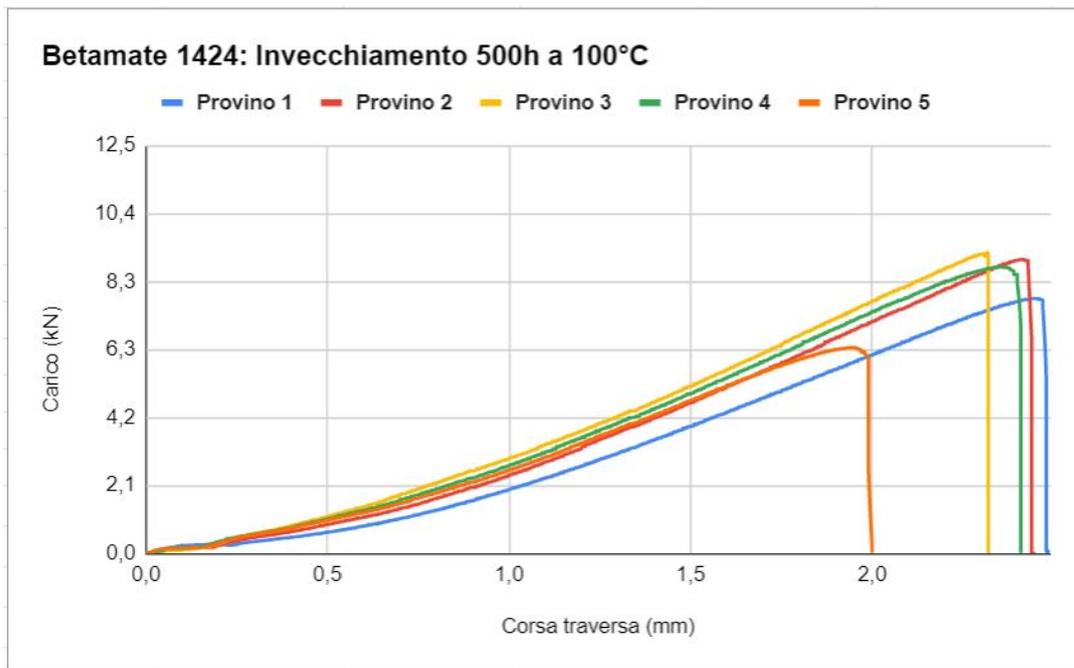


Figura 5.27: Andamenti carico-corsa dei provini con invecchiamento 500 ore a 100°C.

I valori massimi del carico e tensione di rottura sono, invece, riassunti nella tabella 5.17.

Campione	Carico massimo (<i>kN</i>)	Tensione di rottura (<i>MPa</i>)
1	7,81	26,03
2	9,01	30,03
3	9,19	30,62
4	8,78	29,27
5	6,30	21,01

Tabella 5.17: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini sottoposti a trazione a temperatura ambiente.

Il provino 5 presenta una tensione di rottura notevolmente più bassa rispetto agli altri. Osservando le superfici di rottura (figura 5.28) si potrebbe attribuire questo risultato ad una carenza di adesivo sul lato sinistro del provino.

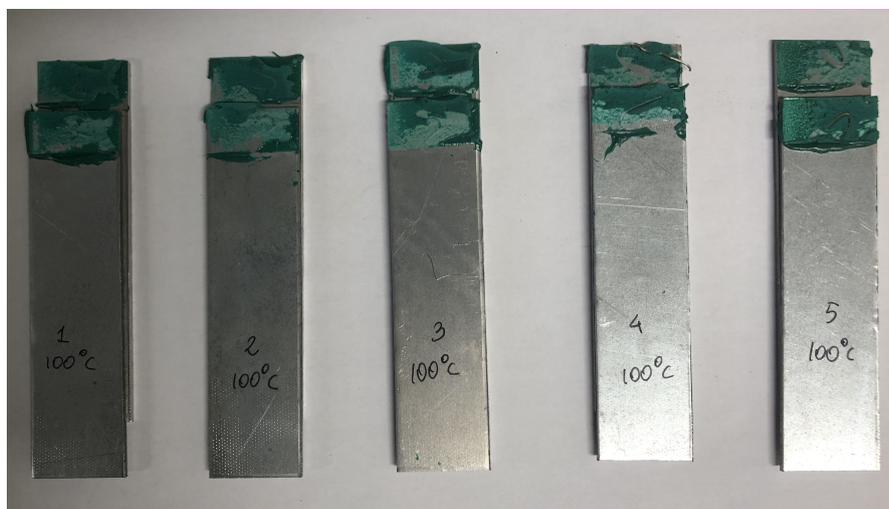


Figura 5.28: Superfici di frattura dei campioni sottoposti a ciclo di invecchiamento 500 ore a 100°C.

5.4.3 Temperatura ambiente con invecchiamento 500h in nebbia salina

Altri cinque campioni hanno effettuato l'invecchiamento di 500 ore in camera nebbia salina e sono stati sottoposti a prova di taglio a trazione a temperatura ambiente.

Ancora una volta sono mostrati gli andamenti di risposta dei provini (figura 5.29), in funzione della corsa della traversa e del carico, mentre in tabella 5.18 sono riassunti i valori del carico e tensione massima, prima della rottura.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (Mpa)
1	6,31	21,02
2	5,41	18,03
3	5,58	18,60
4	7,12	23,73
5	6,00	20,00

Tabella 5.18: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini, invecchiati in nebbia salina, sottoposti a trazione a temperatura ambiente

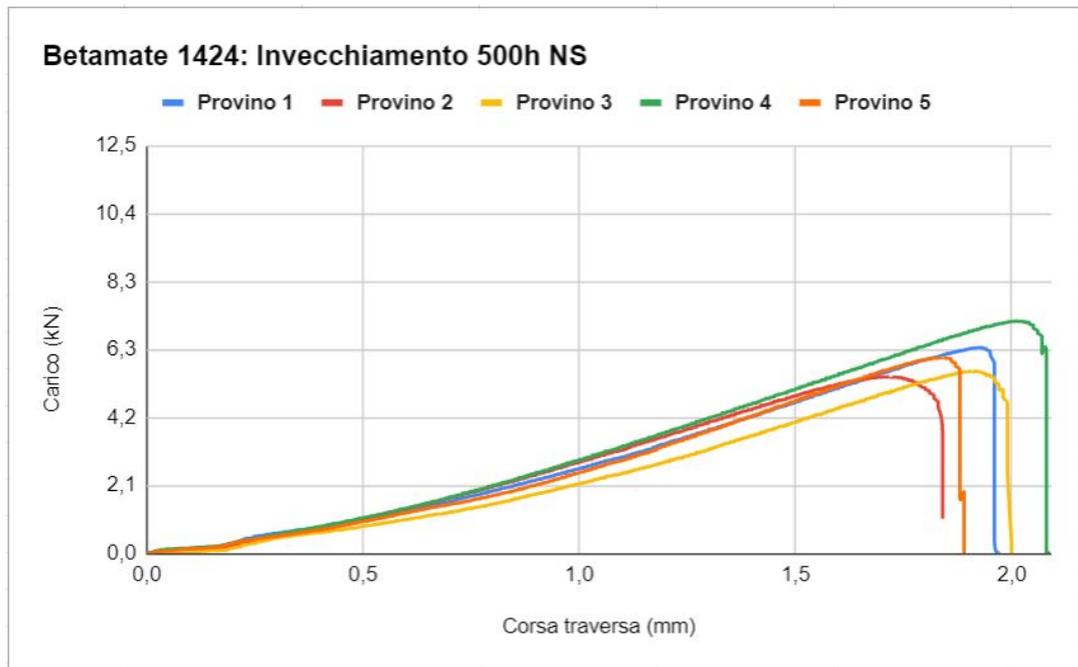


Figura 5.29: Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1424 e invecchiamento 500 ore in nebbia salina.



Figura 5.30: Superfici di frattura dei campioni sottoposti ad invecchiamento 500 ore in nebbia salina e prova di trazione a temperatura ambiente.

5.4.4 Temperatura ambiente con invecchiamento 500h in CTUS

I seguenti provini hanno effettuato un ciclo di invecchiamento 500 ore in camera umida e successivamente sono stati sottoposti alla prova di taglio a temperatura ambiente.

In figura 5.31 è riportato il grafico di risposta dei provini, mentre in tabella 5.19 il carico e tensione massima raggiunta.

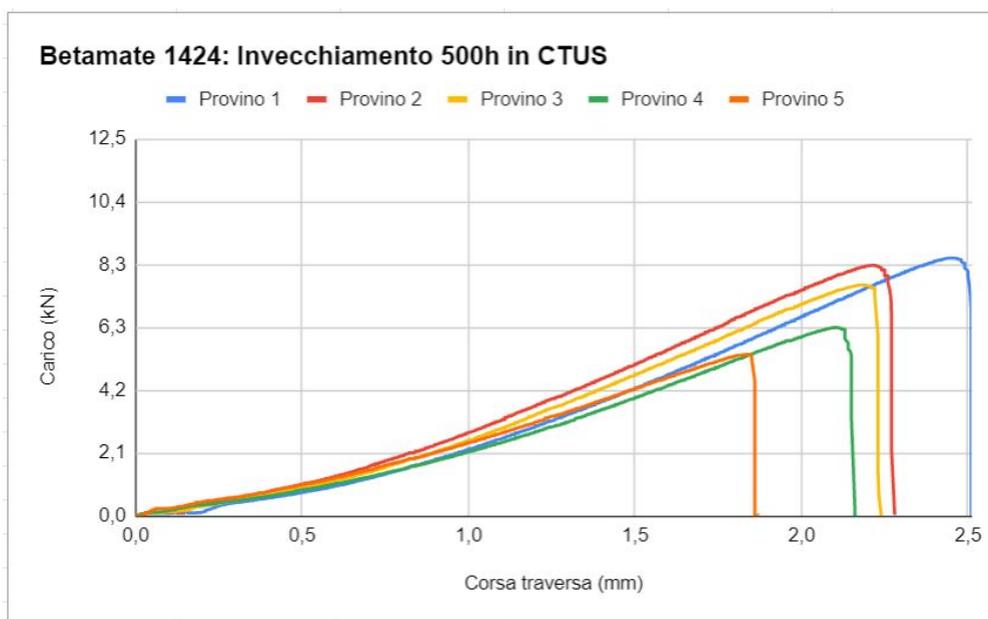


Figura 5.31: Andamenti carico-corsa dei provini con Betamate 1424 e invecchiamento 500 ore in CTUS.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	8,55	28,52
2	8,31	27,70
3	7,66	25,54
4	6,24	20,82
5	5,35	17,83

Tabella 5.19: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini, invecchiati in CTUS e sottoposti a trazione a temperatura ambiente

Le superfici di rottura sono mostrate invece in figura 5.32.

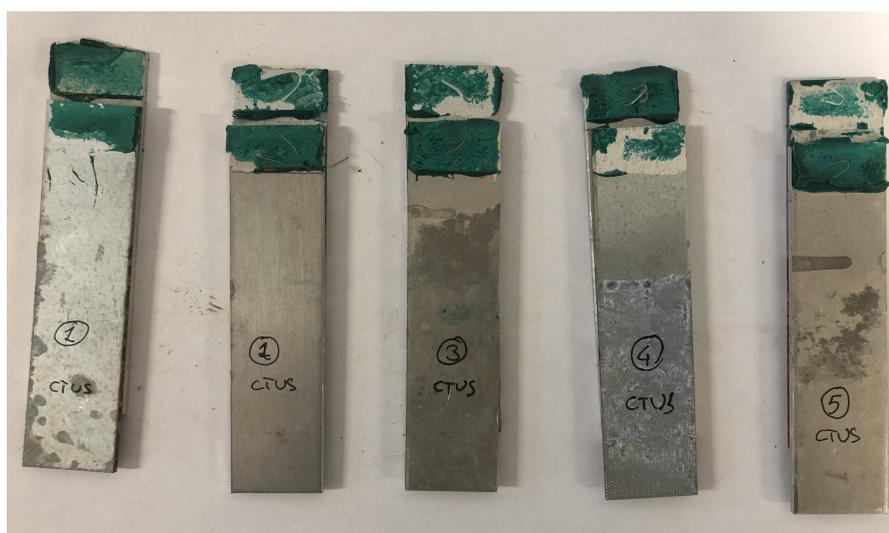


Figura 5.32: Superfici di frattura dei campioni sottoposti ad invecchiamento 500 ore in camera umida e prova di trazione a temperatura ambiente.

5.4.5 Temperatura di prova $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ senza invecchiamento

Alcuni provini sono stati destinati alle prove di taglio a trazione a temperatura di -40°C , senza aver precedentemente effettuato l'invecchiamento.

I grafici di risposta sono mostrati in figura 5.33, mentre le rispettive superfici di rottura in figura 5.34:

Infine, nella tabella 5.20 è possibile osservare i valori massimi del carico e tensione di rottura ottenuti per questi provini.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	10,41	34,70
2	9,80	32,66
3	9,65	32,18
4	10,59	35,31
5	11,89	39,62

Tabella 5.20: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini che hanno effettuato la prova di trazione alla temperatura di -40°C .

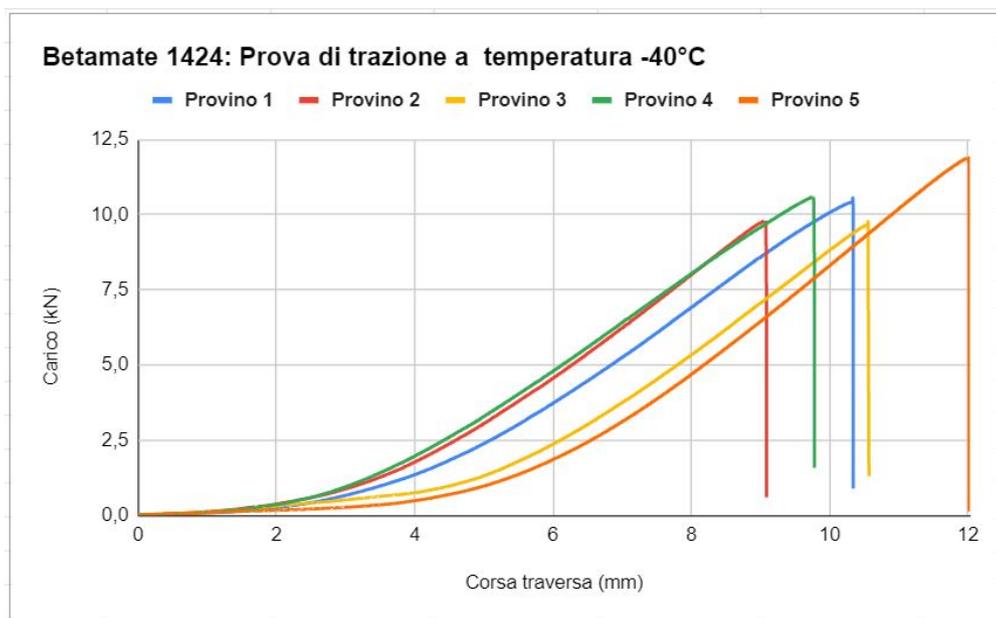


Figura 5.33: Andamenti carico-corsa della prova di trazione alla temperatura di -40°C.

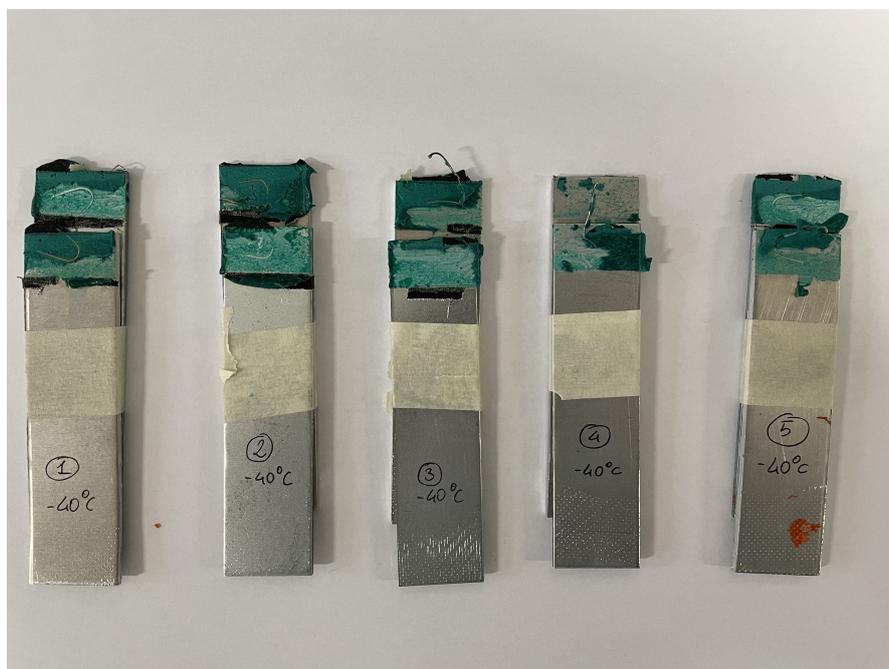


Figura 5.34: Superfici di frattura dei campioni sottoposti ad invecchiamento 500 ore in camera umida e prova di trazione a temperatura ambiente.

5.4.6 Temperatura di prova 80°C senza invecchiamento

Per concludere la caratterizzazione della resistenza al distacco per taglio dell'adesivo specifico per i giunti in acciaio, sono state effettuate delle prove di trazione alla temperatura di 80°C.

La tabella 5.21 mostra i valori carico e tensione massimi raggiunti dai provini.

Campione	Carico massimo (kN)	Tensione di rottura (MPa)
1	5,12	17,06
2	3,48	11,61
3	3,22	10,74
4	4,45	14,84
5	2,92	9,72

Tabella 5.21: Carico e tensione di rottura raggiunte dai provini che hanno effettuato la prova di trazione a 80°C.

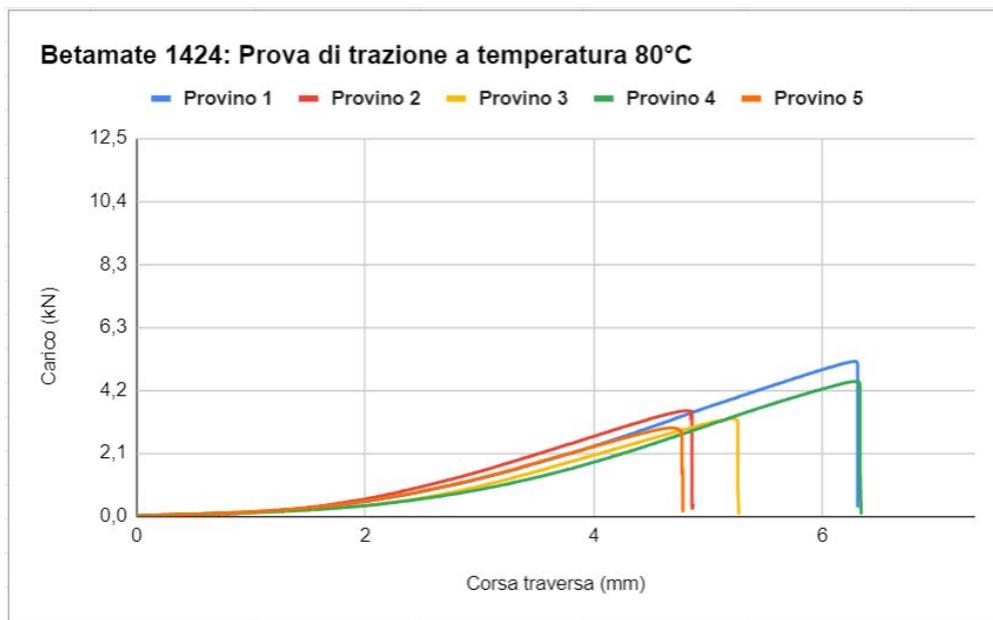


Figura 5.35: Andamenti carico-corsa per campioni con Betamate 1822 e prova di trazione a 80°C.

I grafici di risposta sono mostrati in figura 5.35, mentre le rispettive superfici di rottura in figura 5.36.



Figura 5.36: Superfici di frattura dei campioni sottoposti a prova di trazione a temperatura di 80°C.

5.5 Valutazione dell'elasticità

L'analisi della resistenza al distacco per taglio dell'adesivo si conclude con la valutazione del modulo di elasticità, detto anche modulo di Young (E). Maggiore è il modulo E più il materiale è rigido e tanto minore sarà l'allungamento.

La valutazione del modulo E è stata condotta considerando solo le prove di trazione a temperatura ambiente, per ogni tipo di adesivo. L'ipotesi semplificativa alla base di questa valutazione è la considerazione della corsa della traversa come delta allungamento del provino (ΔL).

La valutazione del modulo di elasticità parte dall'identificazione di un tratto rettilineo, per ogni prova, in cui esiste la proporzionalità tra il carico applicato (F) e il corrispettivo allungamento del provino (ΔL).

Il modulo di elasticità è definito come (equazione 5.1):

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} [N/mm^2] \quad (5.1)$$

in cui ϵ rappresenta la deformazione ($\epsilon = \frac{\Delta L}{L_{iniziale}}$) e σ la tensione riferita alla superficie iniziale ($\sigma = \frac{F}{S_{iniziale}}$).

Un'alternativa alla valutazione del modulo di Young è utilizzare una considerazione grafica. Infatti, identificando il tratto lineare della curva $\sigma - \epsilon$, il modulo di elasticità ne rappresenta il coefficiente angolare della retta. Questo è stato il metodo adottato per la valutazione del modulo di elasticità.

I valori del modulo di Young che sono stati ricavati sono stati riportati nella tabella 5.22.

	MODULO DI ELASTICITÀ [MPa]		
	<i>Betamate 1822</i>	<i>Betamate 1424</i>	<i>Betamate 4600</i>
Provino 1	185,03	230,83	242,23
Provino 2	196,41	173,23	232,33
Provino 3	162,21	212,97	233,67
Provino 4	170,83	194,93	240,11
Provino 5	171,85	195,78	241,12
Media	177,26	201,55	237,89

Tabella 5.22: Moduli di Young a temperatura ambiente, per ogni adesivo.

È possibile osservare come i provini realizzati con l'adesivo specifico per i giunti ibridi (*Betamate 1822*) sono più elastici in quanto presentano un modulo E più basso, mentre l'utilizzo dell'adesivo specifico per i giunti in alluminio (*Betamate 4600*) determina dei provini più rigidi.

Parte III

Prove di dilatazione termica differenziata

Capitolo 6

Attività preliminari

Le modalità di preparazione, applicazione dell'adesivo e le tipologie di prove sono ripetute analogamente per tutte e tre le tipologie di adesivo: Betamate 1822, Betamate 4600 e Betamate 1424.

Per ogni tipo di adesivo sono stati realizzati i seguenti campioni (tabella 6.1):

Quantità	Adesivo	Temperatura cottura	Applicazione adesivo
3	Betamate 1822	180°C	Cordolo continuo
3	Betamate 4600	180°C	Cordolo continuo
3	Betamate 1424	180°C	Cordolo continuo

Tabella 6.1: Quantità e caratteristiche dei provini realizzati

6.1 Preparazione delle lamiera

I provini sono stati preparati in collaborazione con i laboratori meccanici del CRF. Le lamiera di acciaio e alluminio, sono state inizialmente fornite sotto forma di un foglio di dimensioni desiderate 250 x 500 mm.

La forma dei provini, visibile in figura 6.1, è stata realizzata con una piegatrice manuale presente nei laboratori meccanici. La lamiera inferiore è in acciaio, mentre le due lamiera superiori sono in alluminio.

È stato deciso di realizzare le lamiera non simmetriche per due motivi. In primo luogo perché l'utilizzo della piegatrice manuale pone dei limiti sulla geometria delle lamiera, che risulterebbero impiegnabili per interferenza con il macchinario. La seconda motivazione è che così si ha la possibilità di indagare se il posizionamento della giunzione, più vicino all'alluminio o all'acciaio (rispettivamente denominati lato sinistro e lato destro), ha un'influenza sulle dilatazioni delle lamiera.

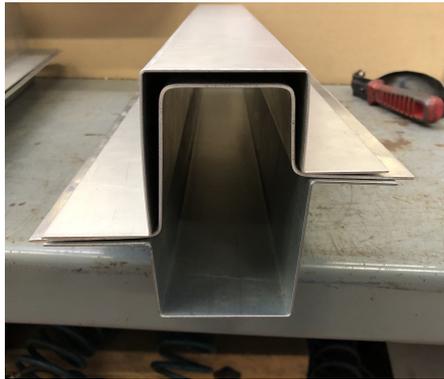


Figura 6.1: Sezioni delle lamiere a seguito della piegatura

Prima dell'applicazione dell'adesivo, i profilati realizzati sono stati forati con una punta di diametro di 3 mm, come mostrato in figura 6.2



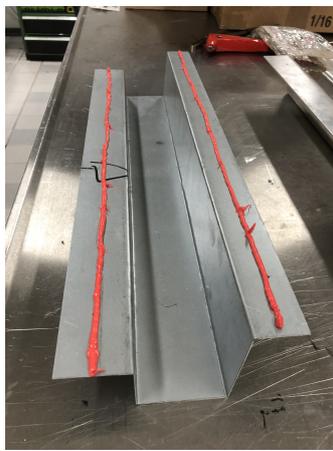
(a)

Figura 6.2: Modalità di foratura dei provini.

6.2 Applicazione dell’adesivo

L’adesivo è stato applicato con una pistola automatica. La tipologia di adesivo utilizzata, strutturale epossidico, non necessita di particolari trattamenti di pulizia delle superfici. Di conseguenza, le zone di interfaccia tra le lamiere sono state esclusivamente pulite con un panno, senza l’utilizzo di prodotti aggiuntivi.

I campioni sono stati realizzati con la modalità di applicazione *cordolo continuo*, ovvero l’adesivo viene erogato in modo continuato su tutta la lunghezza delle lamiere (esempio figura sinistra di 6.3), anche in corrispondenza dei fori per i rivetti.



(a)

Figura 6.3: Esempio di applicazione dell’adesivo cordolo continuo.

L’adesivo viene applicato sia nella zona di interfaccia alluminio-acciaio, sia tra alluminio-alluminio, per un totale di quattro cordoli a campione.

6.3 Applicazione dei rivetti

In seguito all’applicazione dell’adesivo, si procede con l’inserimento dei *pop rivet*, nei fori precedentemente realizzati.

Per fissare il rivetto è stata utilizzata una rivettatrice manuale (figura 6.4).

L’operazione di rivettatura risulta essere conclusa quando il gambo del rivetto si rompe, producendo conseguentemente un rumore di rottura.

Quanto descritto risulta essere rappresentato in figura 6.5.



Figura 6.4: rivettatrice manuale e rivetti utilizzati



(a)



(b)

Figura 6.5: Operazione di rivettatura dei campioni: a) inserimento del rivetto nel foro della giunzione; b) aspetto del rivetto al termine dell'operazione di rivettatura.

6.4 Scelta dei punti di misura

Prima di procedere con la cottura dei provini, è necessario effettuare le prime misure. A tale scopo, il provino è stato suddiviso in un lato destro e sinistro, indicando rispettivamente l'aletta di giunzione più vicina alla lamiera acciaio e all'alluminio.

Per ogni lato sono stati individuati 13 punti di misura, in modo da avere un eguale numero di punti rispetto alla mezzeria dei campioni. Inoltre, poiché è importante valutare il comportamento delle lamiere in corrispondenza dei rivetti, sono stati individuati dei punti di misura in loro corrispondenza.

La posizione dei punti, rispetto all'estremità delle lamiere, è riportata nella tabella 6.2.

Punto di misura	Posizione (mm)	Rivetto
1	0	
2	40	si
3	80	
4	120	
5	160	
6	200	
7	250	si
8	300	
9	340	
10	380	
11	420	
12	460	si
13	500	

Tabella 6.2: Posizione dei punti di misura, per ogni lato dei provini

I provini così realizzati sono stati analizzati tramite delle misurazioni condotte per valutare lo spessore del pacchetto lamiera e del gioco tra esse.

6.5 Cottura provini

Successivamente sono stati cotti nelle stufe del laboratorio di adesivi del CRF.

Nei casi studiati è stata utilizzata una temperatura di 180°C. Questo valore rappresenta il massimo valore di temperatura raggiunta nel processo di cataforesi.

Sotto tali condizioni di temperatura l'adesivo epossidico polimerizza, ovvero solidifica e si indurisce.

Prima di procedere con le misurazioni dopo cottura si è atteso un tempo sufficientemente lungo affinché la temperatura del provino si stabilizzasse alla temperatura ambiente.

Capitolo 7

Svolgimento prove di dilatazione termica

7.1 Obiettivo

L'obiettivo delle prove di dilatazione termica differenziata è la valutazione di una eventuale deformazione residua dovuto ad un mancato ritorno elastico delle lamiere, in un dato provino dopo varie simulazioni di cottura. Alle elevate temperature di simulazione, infatti, le lamiere di acciaio e alluminio si dilatano in modo differente, in campo elastico. Se l'adesivo, a seguito della polimerizzazione, ostacola il ritorno elastico di esse, vi possono essere delle deformazioni residue all'interfaccia che possono compromettere la funzionalità e la resistenza delle parti coinvolte.

Per verificare ciò, sono state eseguite una serie di misurazioni con calibro elettronico e spessimetro. Il *calibro* ha permesso la misura, precisa al centesimo, dello spessore di tutto il pacco lamiera. In particolare sono state effettuate tre misurazioni per ogni punto di interesse e di esse è stato considerato un valor medio. Valutare lo spessore del pacchetto della giunzione ha una duplice importanza. Da un lato un pacchetto di dimensioni irregolari può non garantire la montabilità di altri componenti, dall'altro lato la rigidità del giunto può essere compromessa in quanto risulta ottimale se la distanza tra le lamiere, e di conseguenza lo spessore del pacchetto, è minima.

Lo *spessimetro* ha permesso la valutazione del gioco presente tra due lamiere. In particolare sono state effettuate sia le misurazioni tra acciaio e alluminio, che le due lamiere di alluminio. La misura del gioco tra le lamiere permette di valutare le dilatazioni delle lamiere. Eventuali dilatazioni residue possono non essere importanti in zone non estetiche mentre possono comportare problemi funzionali in zone estetiche.

Le misurazioni sono state effettuate sia prima cottura (PC) che dopo cottura (DC) dei provini. Ciò ha permesso di individuare le eventuali dilatazioni termiche residue, a seguito del processo di cottura. Ci si aspetta che le il provino dopo la cottura presenti delle dimensioni del pacco lamiera e giochi tra esse uguali o inferiori al caso prima cottura. Effettuando le misurazioni PC e DC è stato possibile estrapolare sia quali zone risultano essere peggiorative, sia le motivazioni che vi sono alla base di questo comportamento.

7.2 Caso studio: Betamate 1822

L'adesivo *Betamate 1822*, specifico per i giunti ibridi, è stato utilizzato per la realizzazione di 3 provini, come precedentemente mostrato nella tabella 6.1.

I provini (figura 7.1) sono stati realizzati con il metodo di applicazione cordolo continuo e successivamente cotti in forno a 180°C per 30 minuti.

Per ognuno di essi, le misure sono state suddivise tra lato destro e lato sinistro, e in misurazioni effettuate prima cottura (PC) e dopo cottura (DC).

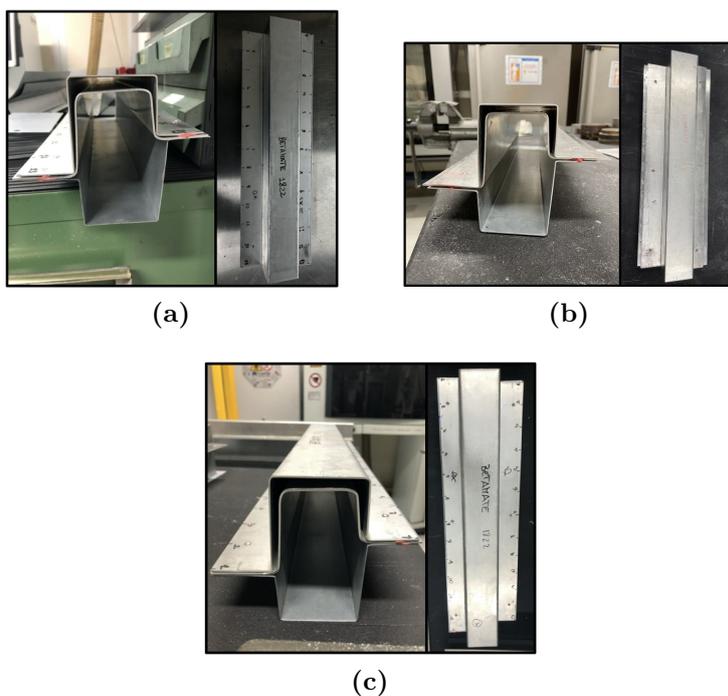


Figura 7.1: Sezione e vista dall'alto dei provini realizzati con Betamate 1822: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

7.2.1 Misura pacchetto lamiera

Nelle figure seguenti sono mostrati i risultati grafici delle misurazioni ottenute del pacchetto lamiera del provino 1 (figura 7.2), del provino 2 (figura 7.3) e del provino 3 (figura 7.4) realizzati con l'adesivo specifico per i giunti ibridi.

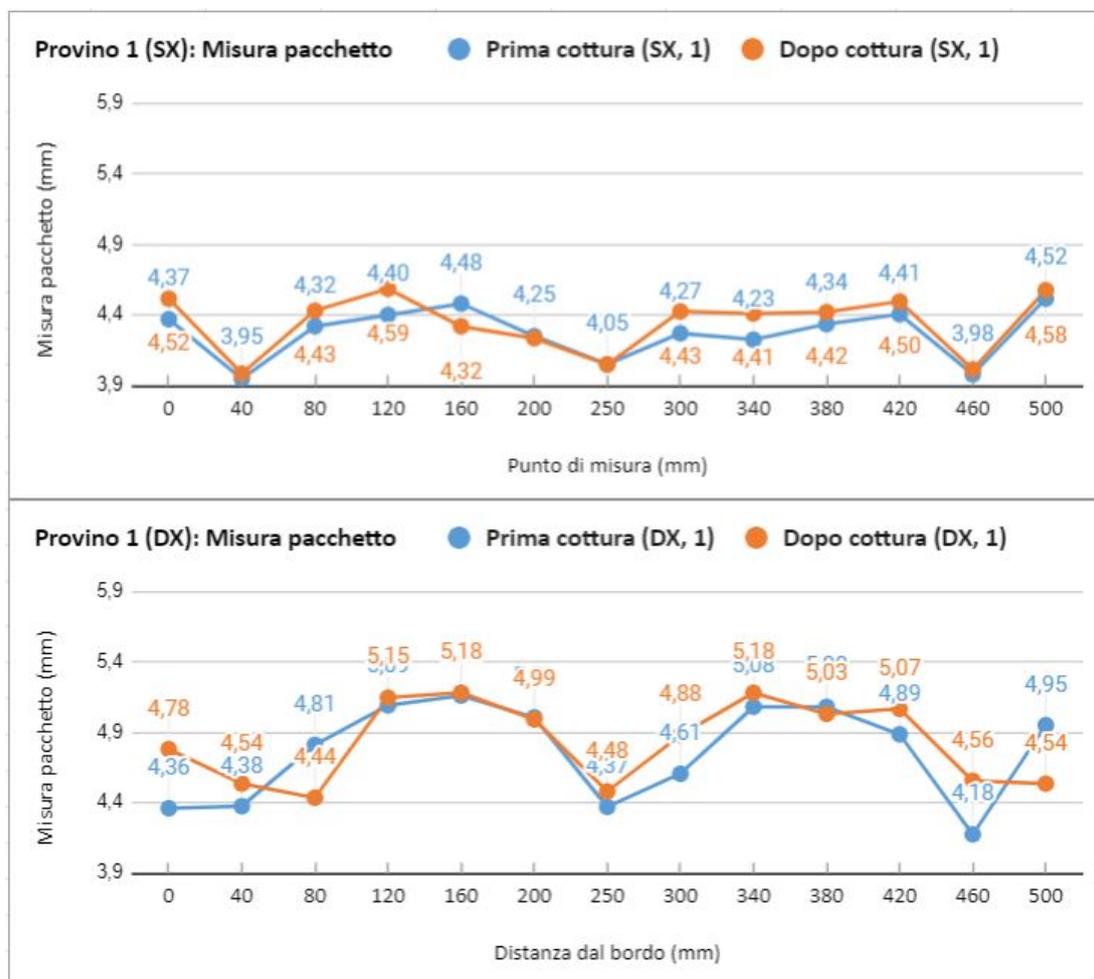


Figura 7.2: Valori medi della misura pacchetto lamiera per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

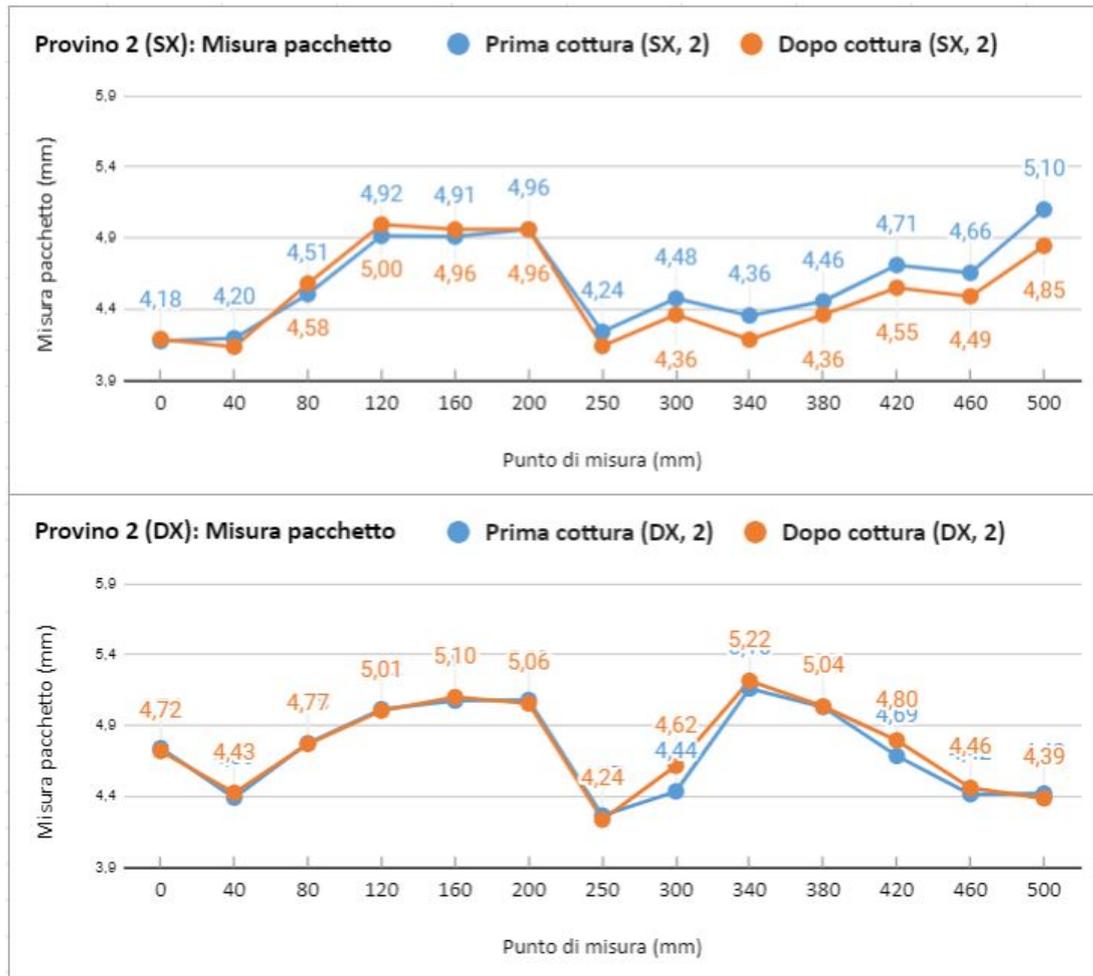


Figura 7.3: Valori medi della misura pacchetto lamiera per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

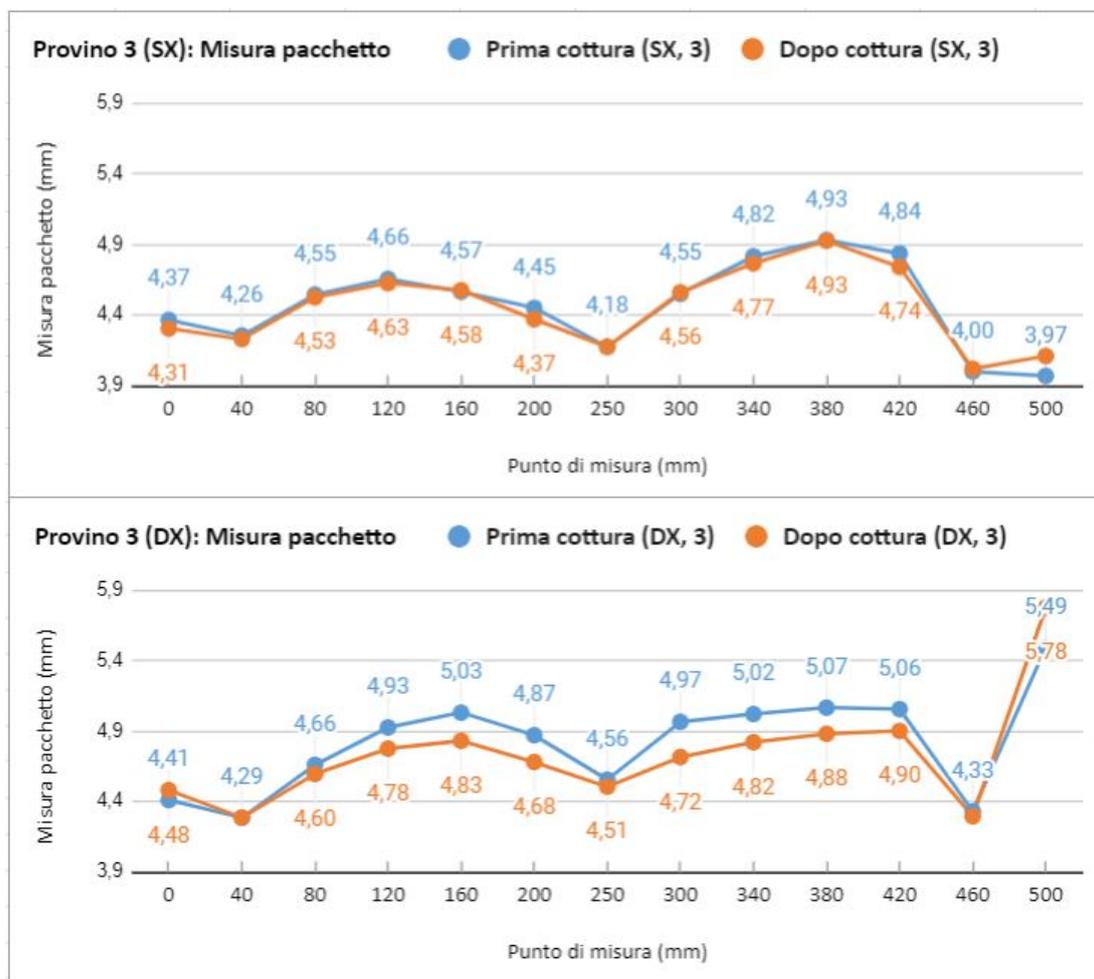


Figura 7.4: Valori medi della misura pacchetto lamiera per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

La situazione prima della cottura (PC) dei provini, con l'adesivo non polimerizzato, è rappresentata in blu. Possiamo notare come si hanno dei minimi locali in corrispondenza dei rivetti. Mentre tra un rivetto e il successivo si notano delle oscillazioni del valore misurato possibilmente dovute all'azione del rivetto che tende già a tirare le lamiere o a seguito di irregolarità di forma delle lamiere stesse.

Dopo la cottura (DC) dei provini l'adesivo polimerizza, situazione rappresentata in rosso. Anche DC si riscontrano degli andamenti analoghi alle misure precedenti. Infatti, la posizione dei rivetti rappresenta sempre un minimo locale, mentre, come ci si aspettava, in molti punti di misura si riscontrano dei valori inferiori rispetto al caso PC. Alcuni punti di misura presentano dei valori della dimensione del pacchetto lamiera superiore al caso PC che determinano di conseguenza la presenza di dilatazioni.

Per riassumere i valori misurati in ogni punto, lato destro e sinistro, sono riportati nelle immagini seguenti (figura 7.5). Si ricorda che nelle posizioni 2, 7 e 12 sono situati i rivetti (evidenziate in giallo nella figura 7.5).

		Con calibro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)		Misura prima	Misura dopo
				cottura	cottura
1	1	0	SX	4,37	4,52
			DX	4,36	4,78
	2	40	SX	3,95	3,99
			DX	4,38	4,54
	3	80	SX	4,32	4,43
			DX	4,81	4,44
	4	120	SX	4,40	4,59
			DX	5,09	5,15
	5	160	SX	4,48	4,32
			DX	5,16	5,18
	6	200	SX	4,25	4,24
			DX	5,01	4,99
	7	250	SX	4,05	4,05
DX			4,37	4,48	
8	300	SX	4,27	4,43	
		DX	4,61	4,88	
9	340	SX	4,23	4,41	
		DX	5,08	5,18	
10	380	SX	4,34	4,42	
		DX	5,08	5,03	
11	420	SX	4,41	4,5	
		DX	4,89	5,07	
12	460	SX	3,98	4,02	
		DX	4,18	4,56	
13	500	SX	4,52	4,58	
		DX	4,96	4,54	

(a)

		Con calibro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)		Misura prima	Misura dopo
				cottura	cottura
2	1	0	SX	4,18	4,19
			DX	4,74	4,72
	2	40	SX	4,20	4,14
			DX	4,39	4,43
	3	80	SX	4,51	4,58
			DX	4,78	4,77
	4	120	SX	4,92	5,00
			DX	5,02	5,01
	5	160	SX	4,91	4,96
			DX	5,08	5,10
	6	200	SX	4,96	4,96
			DX	5,08	5,06
	7	250	SX	4,24	4,14
DX			4,27	4,24	
8	300	SX	4,48	4,36	
		DX	4,44	4,62	
9	340	SX	4,36	4,19	
		DX	5,16	5,22	
10	380	SX	4,46	4,36	
		DX	5,03	5,04	
11	420	SX	4,71	4,55	
		DX	4,69	4,80	
12	460	SX	4,66	4,49	
		DX	4,42	4,46	
13	500	SX	5,10	4,85	
		DX	4,42	4,39	

(b)

		Con calibro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)		Misura prima	Misura dopo
				cottura	cottura
3	1	0	SX	4,37	4,31
			DX	4,41	4,48
	2	40	SX	4,26	4,23
			DX	4,29	4,29
	3	80	SX	4,55	4,53
			DX	4,66	4,60
	4	120	SX	4,66	4,63
			DX	4,93	4,78
	5	160	SX	4,57	4,58
			DX	5,03	4,83
	6	200	SX	4,45	4,37
			DX	4,87	4,68
	7	250	SX	4,18	4,18
DX			4,56	4,51	
8	300	SX	4,55	4,56	
		DX	4,97	4,72	
9	340	SX	4,82	4,77	
		DX	5,02	4,82	
10	380	SX	4,93	4,93	
		DX	5,07	4,88	
11	420	SX	4,84	4,74	
		DX	5,06	4,90	
12	460	SX	4,00	4,02	
		DX	4,33	4,30	
13	500	SX	3,97	4,11	
		DX	5,49	5,78	

(c)

Figura 7.5: Tabelle riassuntive dei valori misurati del pacchetto lamiera: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

7.2.2 Misura gioco acciaio-alluminio

Tramite l'utilizzo di uno spessimetro è stato possibile misurare il gioco tra le lamiere di acciaio e alluminio. La misura di tale gioco ha permesso di valutare il comportamento dell'adesivo tra le due differenti lamiere.

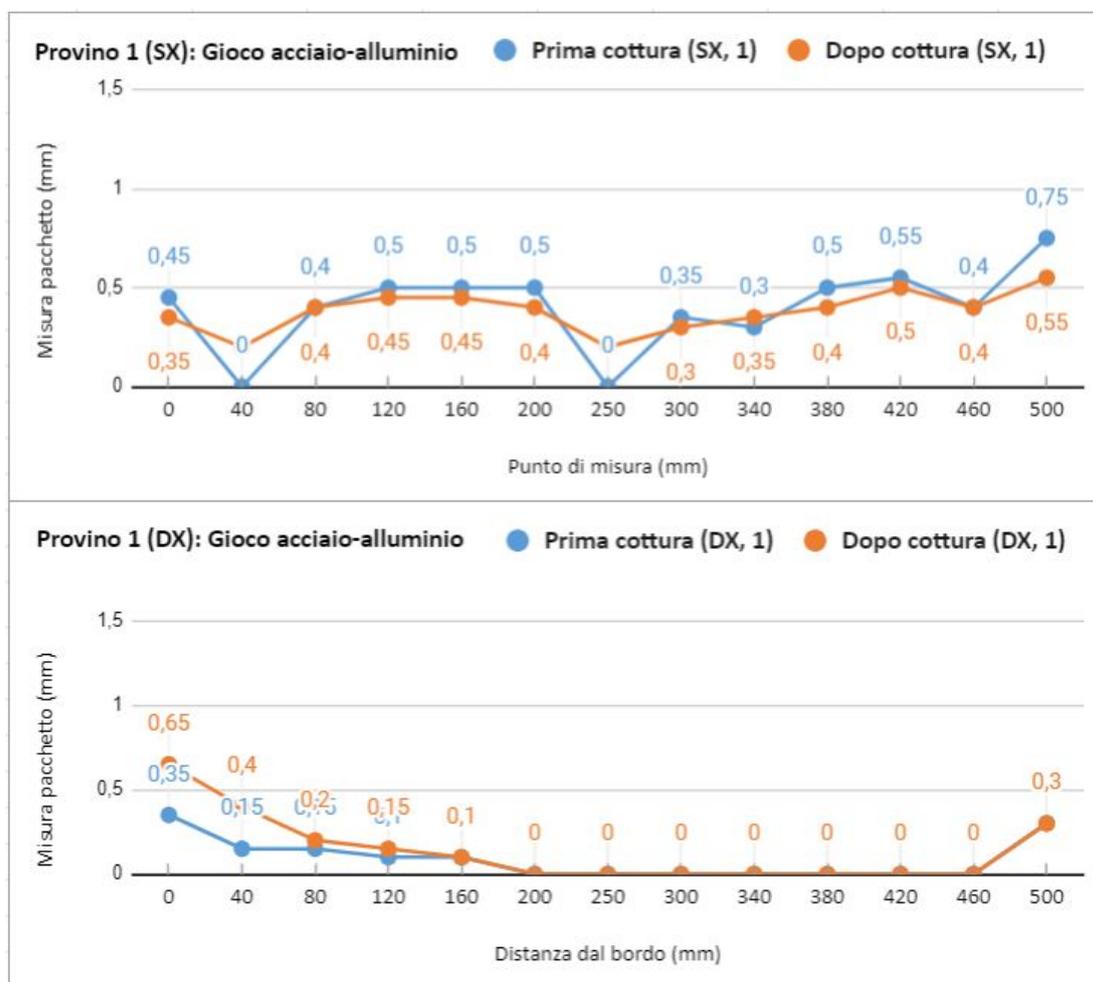


Figura 7.6: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

Nelle figure seguenti sono mostrati i risultati grafici delle misurazioni ottenute del gioco acciaio-alluminio, del provino 1 (figura 7.6), del provino 2 (figura 7.7) e del provino 3 (figura 7.8). La situazione PC è rappresentata in blu, mentre DC in rosso. È possibile osservare come prima della cottura dei provini i valori di gioco tra le lamiere sono nulli o minimi in corrispondenza dei rivetti. L'andamento delle misurazioni ottenute prima cottura rimane abbastanza fedele anche per le

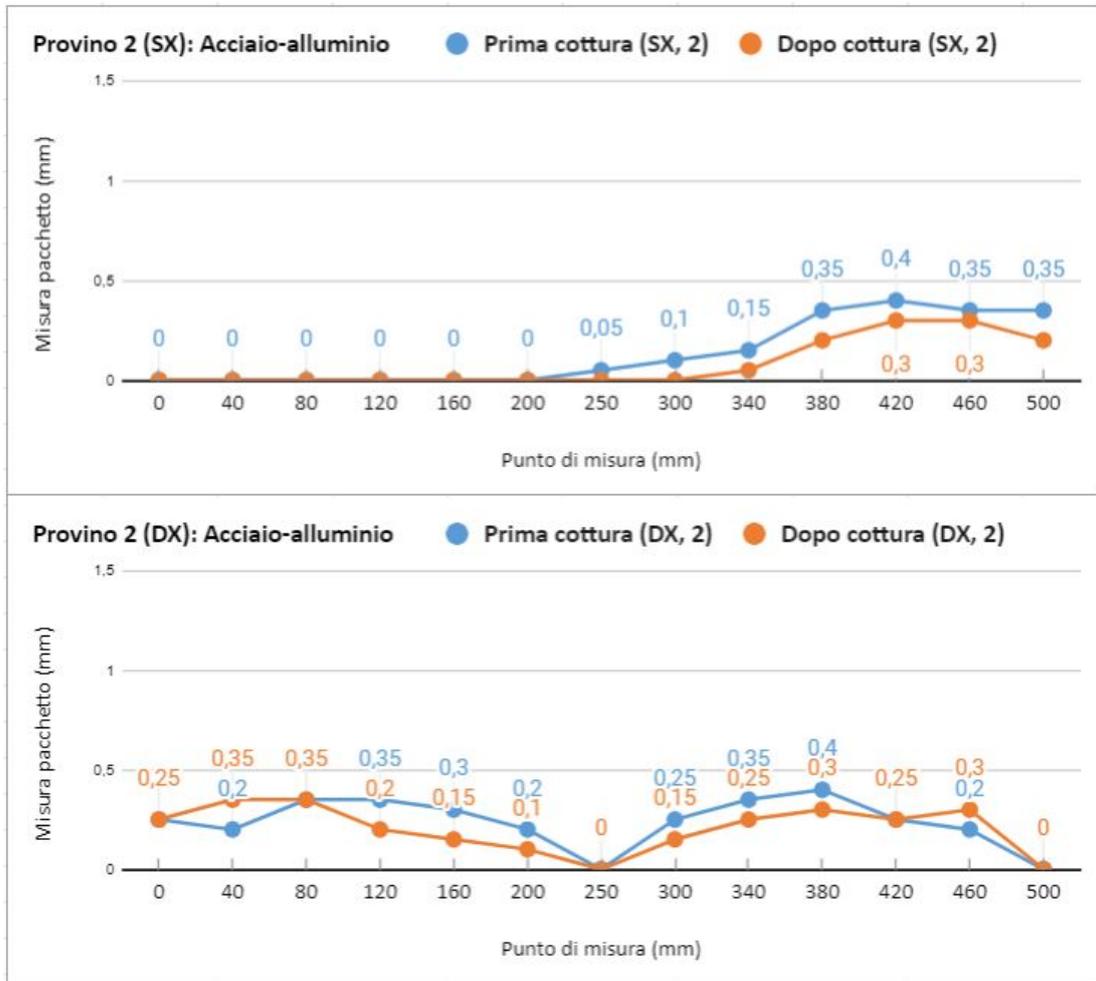


Figura 7.7: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

misurazioni effettuate dopo cottura. Un andamento insolito, però, si verifica nel primo provino per il lato sinistro, in cui i valori dopo cottura in corrispondenza del primo e secondo rivetto sono relativamente più elevati rispetto alla situazione iniziale. Ciò può essere dovuto ad un funzionamento errato dei rivetti.

I valori ottenuti nei punti di misura sono stati raccolti nelle seguenti tabelle (figura 7.9).

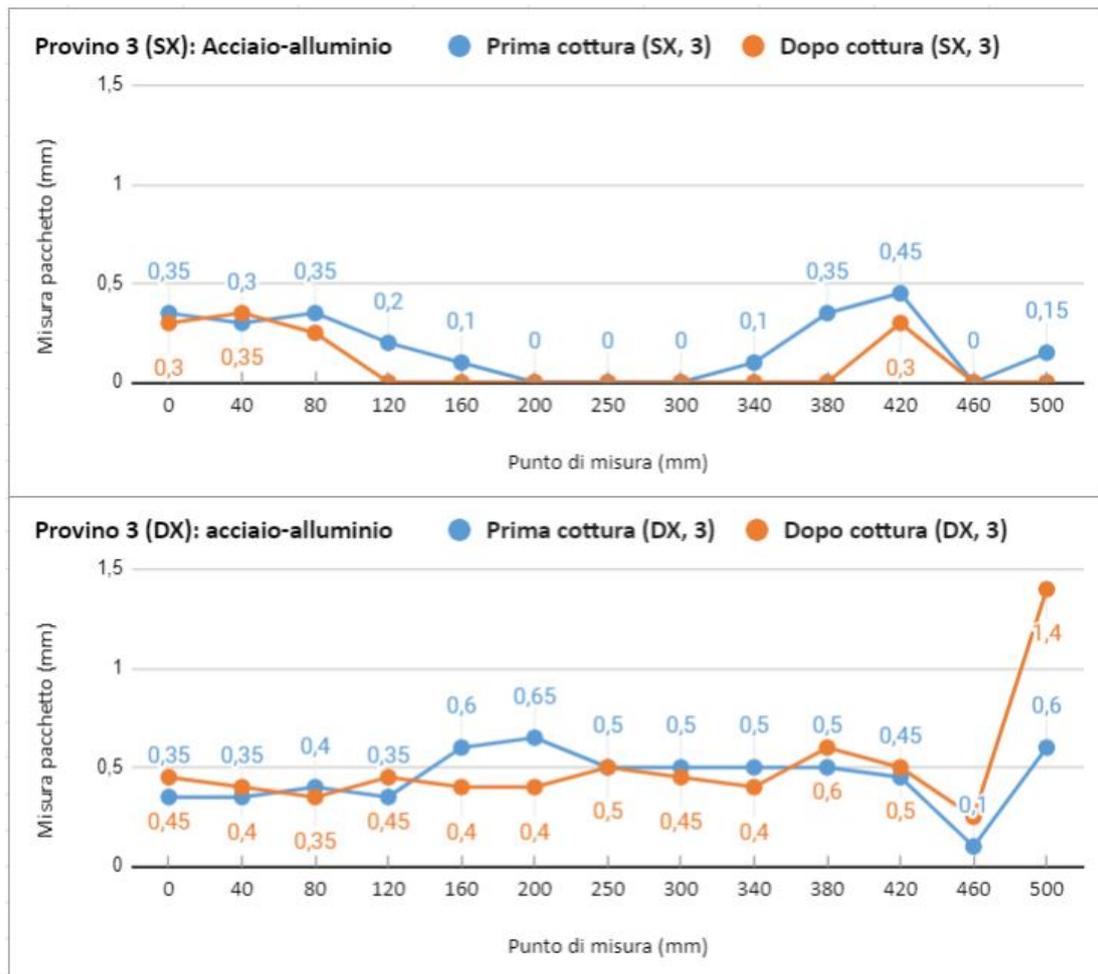


Figura 7.8: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Con spessimetro	
			Gioco acciaio-alluminio prima cottura	Gioco acciaio-alluminio dopo cottura
1	0	SX	0,45	0,35
		DX	0,35	0,65
2	40	SX	0,00	0,20
		DX	0,15	0,40
3	80	SX	0,40	0,40
		DX	0,15	0,20
4	120	SX	0,50	0,45
		DX	0,10	0,15
5	160	SX	0,50	0,45
		DX	0,10	0,10
6	200	SX	0,50	0,40
		DX	0,00	0,00
7	250	SX	0,00	0,20
		DX	0,00	0,00
8	300	SX	0,35	0,3
		DX	0	0
9	340	SX	0,3	0,35
		DX	0	0
10	380	SX	0,5	0,4
		DX	0	0
11	420	SX	0,55	0,5
		DX	0,00	0,00
12	460	SX	0,40	0,40
		DX	0,00	0,00
13	500	SX	0,75	0,55
		DX	0,30	0,30

(a)

P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Con spessimetro	
			Gioco acciaio-alluminio prima cottura	Gioco acciaio-alluminio dopo cottura
1	0	SX	0,00	0,00
		DX	0,25	0,25
2	40	SX	0,00	0,00
		DX	0,20	0,35
3	80	SX	0,00	0,00
		DX	0,35	0,35
4	120	SX	0,00	0,00
		DX	0,35	0,20
5	160	SX	0,00	0,00
		DX	0,30	0,15
6	200	SX	0,00	0,00
		DX	0,20	0,10
7	250	SX	0,05	0,00
		DX	0,00	0,00
8	300	SX	0,1	0
		DX	0,25	0,15
9	340	SX	0,15	0,05
		DX	0,35	0,25
10	380	SX	0,35	0,2
		DX	0,4	0,3
11	420	SX	0,4	0,3
		DX	0,25	0,25
12	460	SX	0,35	0,30
		DX	0,20	0,30
13	500	SX	0,35	0,20
		DX	0,00	0,00

(b)

P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Con spessimetro	
			Gioco acciaio-alluminio prima cottura	Gioco acciaio-alluminio dopo cottura
1	0	SX	0,35	0,30
		DX	0,35	0,45
2	40	SX	0,30	0,35
		DX	0,35	0,40
3	80	SX	0,35	0,25
		DX	0,40	0,35
4	120	SX	0,20	0,00
		DX	0,35	0,45
5	160	SX	0,10	0,00
		DX	0,60	0,40
6	200	SX	0,00	0,00
		DX	0,65	0,40
7	250	SX	0,00	0,00
		DX	0,50	0,50
8	300	SX	0	0
		DX	0,5	0,45
9	340	SX	0,1	0
		DX	0,5	0,4
10	380	SX	0,35	0
		DX	0,5	0,6
11	420	SX	0,45	0,3
		DX	0,45	0,50
12	460	SX	0,00	0,00
		DX	0,10	0,25
13	500	SX	0,15	0,00
		DX	0,60	1,40

(c)

Figura 7.9: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

7.2.3 Misura gioco alluminio-alluminio

Le misure effettuate su i campioni realizzati con l'adesivo per i giunti ibridi terminano con la misurazione del gioco tra le due lamiere di alluminio.

Gli andamenti dei valori medi per ogni punto sono mostrati in figura 7.10 per il provino 1, in figura 7.11 per il provino 2 e in figura 7.12 per il provino 3.

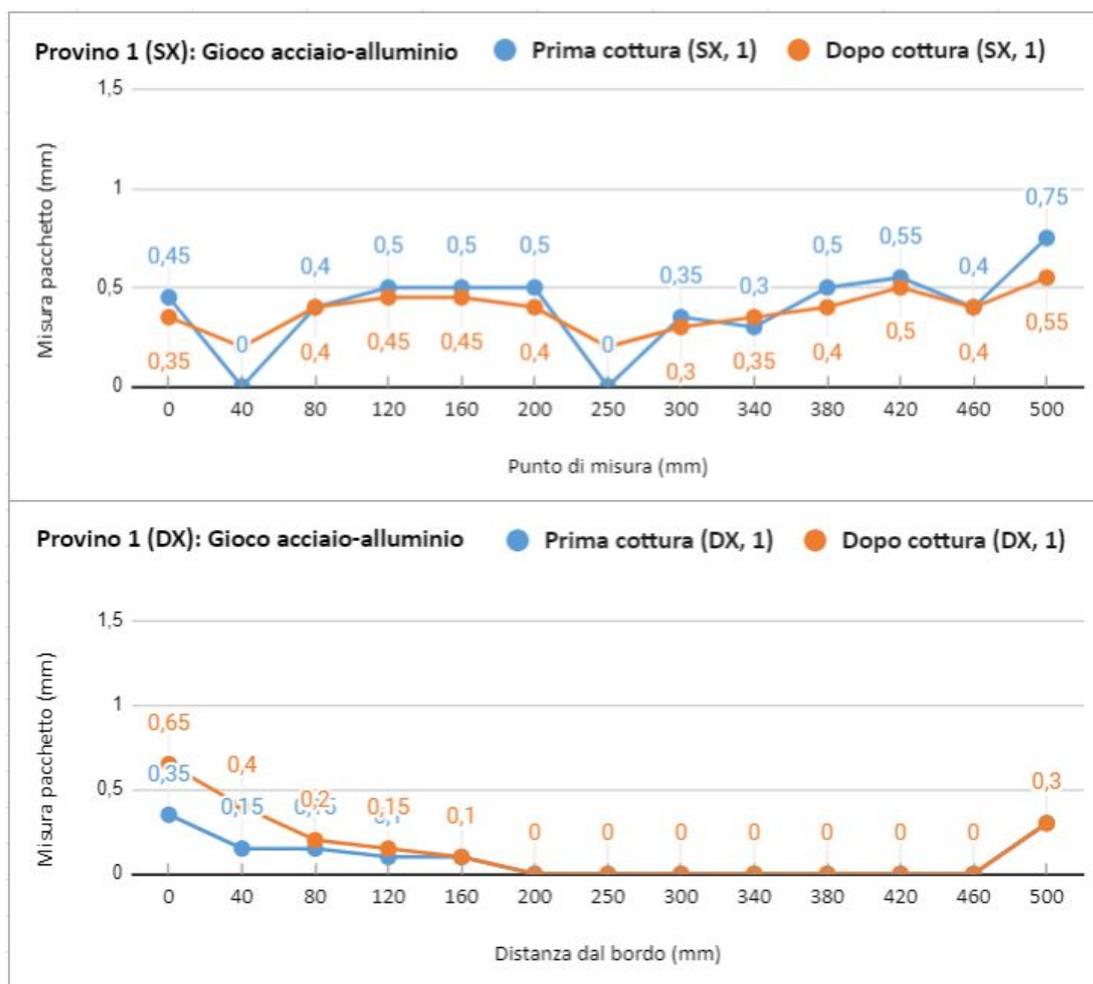


Figura 7.10: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

Anche in questo caso la situazione tra gli andamenti prima cottura (in blu) e dopo cottura (in arancione) sono abbastanza simili tra loro. Si possono notare dei valori di minimo e nulli in corrispondenza dei rivetti e in generale i valori DC risultano inferiori al caso PC.

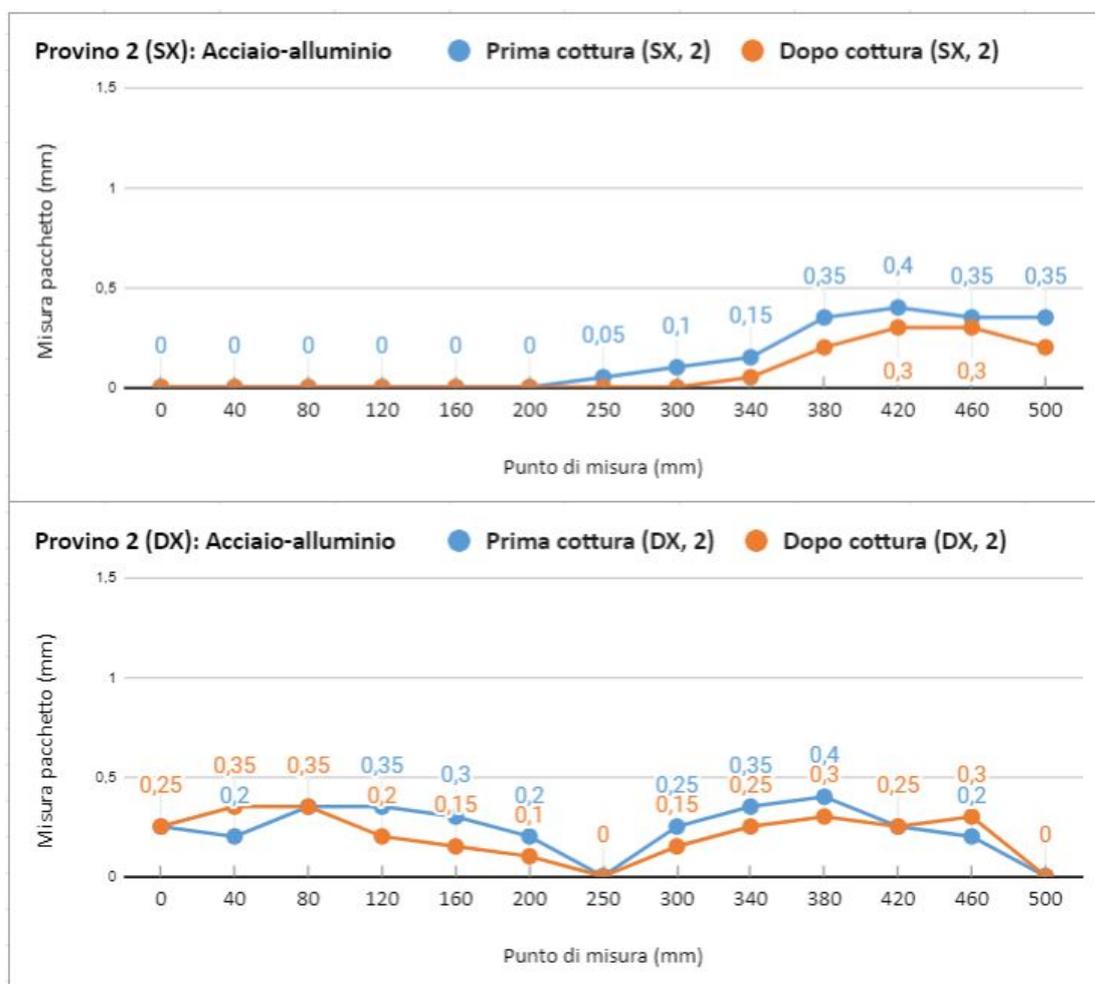


Figura 7.11: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

I valori del gioco tra le lamiere in alluminio sono riportati nelle seguenti tabelle (figura 7.13).

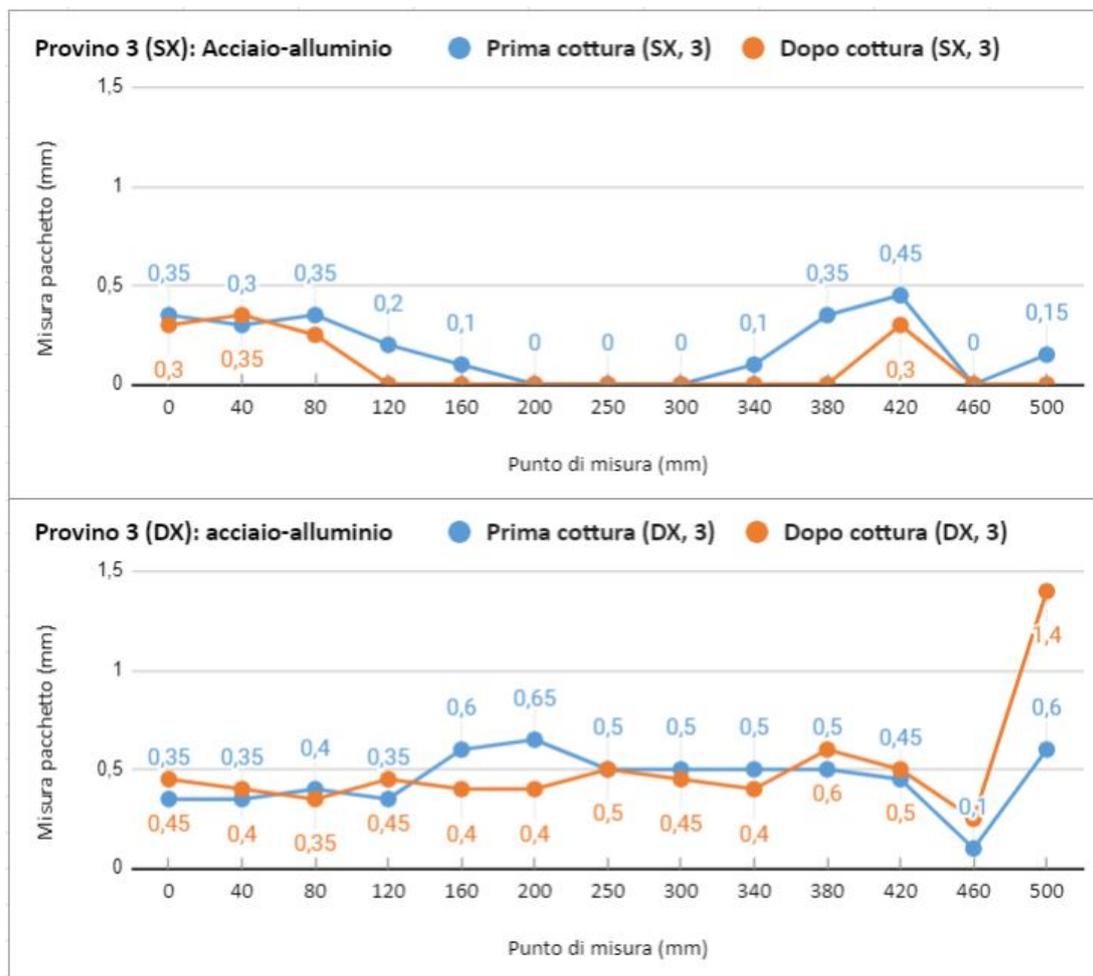


Figura 7.12: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

		Con spessimetro			
N°	Punto (mm)		Gioco alluminio-alluminio prima cottura	Gioco alluminio-alluminio dopo cottura	
			1	0	SX DX
2	40	SX DX	0 0,3	0 0,2	
3	80	SX DX	0 0,8	0 0,7	
4	120	SX DX	0 1,3	0 1	
5	160	SX DX	0 1,5	0 1,15	
6	200	SX DX	0 1,35	0 1,1	
7	250	SX DX	0 0,7	0 0,65	
8	300	SX DX	0,15 0,95	0,05 0,9	
9	340	SX DX	0,1 1,35	0,15 1,15	
10	380	SX DX	0,15 1,4	0,15 1,3	
11	420	SX DX	0,15 1,2	0,15 1	
12	460	SX DX	0 0,3	0 0,25	
13	500	SX DX	0,25 0,45	0,15 0,6	

(a)

		Con spessimetro			
N°	Punto (mm)		Gioco alluminio-alluminio prima cottura	Gioco alluminio-alluminio dopo cottura	
			1	0	SX DX
2	40	SX DX	0 0,2	0 0,1	
3	80	SX DX	0,4 0,45	0,45 0,4	
4	120	SX DX	0,75 0,8	0,75 0,7	
5	160	SX DX	0,95 0,85	0,9 0,75	
6	200	SX DX	0,95 0,95	0,9 0,75	
7	250	SX DX	0,15 0	0,15 0	
8	300	SX DX	0,4 0,25	0,3 0,25	
9	340	SX DX	0 0,85	0 0,7	
10	380	SX DX	0,15 0,6	0,1 0,45	
11	420	SX DX	0,35 0,45	0,25 0,45	
12	460	SX DX	0,35 0	0,25 0	
13	500	SX DX	0,85 0,15	0,6 0	

(b)

		Con spessimetro			
N°	Punto (mm)		Gioco alluminio-alluminio prima cottura	Gioco alluminio-alluminio dopo cottura	
			1	0	SX DX
2	40	SX DX	0,45 0,3	0,35 0,2	
3	80	SX DX	0,85 0,55	0,8 0,55	
4	120	SX DX	1,15 0,7	1 0,7	
5	160	SX DX	1,15 0,7	1 0,7	
6	200	SX DX	0,85 0,6	0,75 0,55	
7	250	SX DX	0,45 0,25	0,45 0,25	
8	300	SX DX	1 0,55	0,95 0,55	
9	340	SX DX	1,25 0,65	1,1 0,7	
10	380	SX DX	1,05 0,75	0,95 0,7	
11	420	SX DX	0,75 0,65	0,7 0,65	
12	460	SX DX	0,25 0,35	0,15 0,35	
13	500	SX DX	0,4 0,5	0,3 0,5	

(c)

Figura 7.13: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

7.3 Caso studio: Betamate 4600

L'adesivo *Betamate 4600*, specifico per i giunti in alluminio, è stato utilizzato per la realizzazione di altri provini. Nonostante la non specificità dell'adesivo con l'acciaio, questo è stato applicato anche nell'interfaccia tra alluminio e acciaio. Questo ha permesso di valutare eventuali effetti, positivi o negativi, nell'utilizzo dell'adesivo con l'acciaio, al fine di delineare delle linee guida per la progettazione dei giunti ibridi e la ricerca della migliore configurazione di questi.

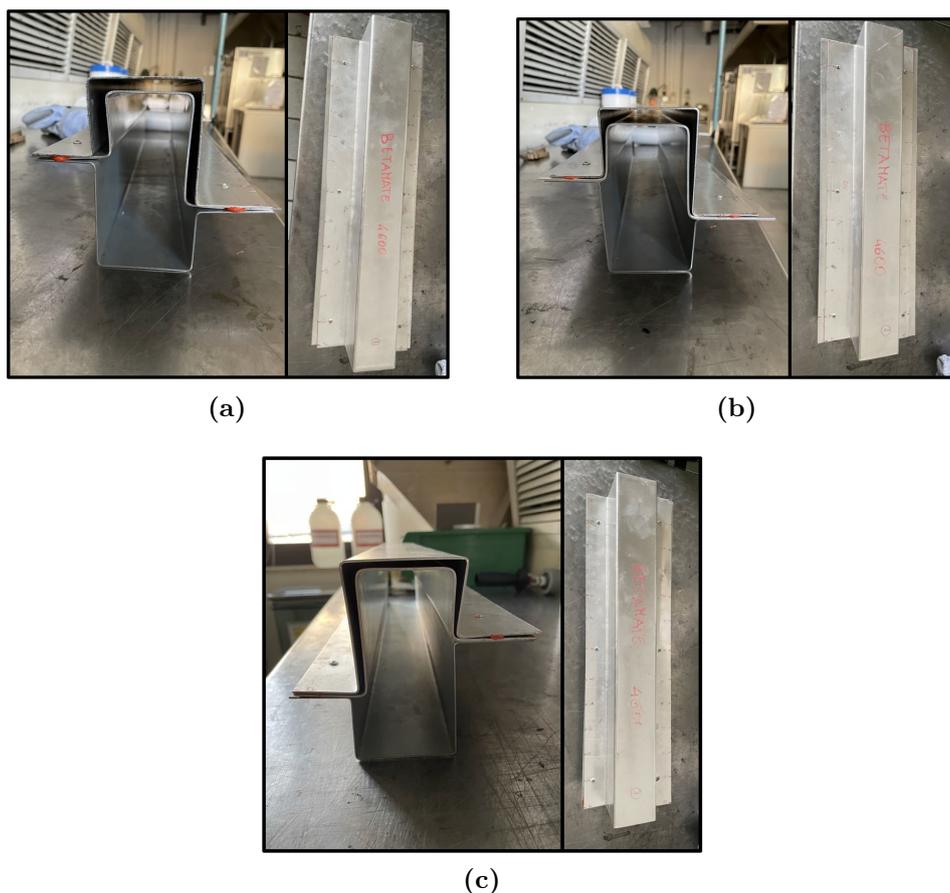


Figura 7.14: Sezione e vista dall'alto dei provini realizzati con Betamate 4600: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

7.3.1 Misura pacchetto lamiera

La situazione prima della cottura dei provini, con l'adesivo non polimerizzato, è rappresentata in blu, nella figura 7.15 il provino 1, figura 7.16 il provino 2 e

infine figura 7.17 il provino 3. Possiamo notare come, anche con questo tipo di adesivo, si hanno dei minimi locali in corrispondenza dei rivetti. Tra un rivetto e il successivo, invece, si notano delle oscillazioni del valore misurato possibilmente dovute all'azione del rivetto che tende già a tirare le lamiere.

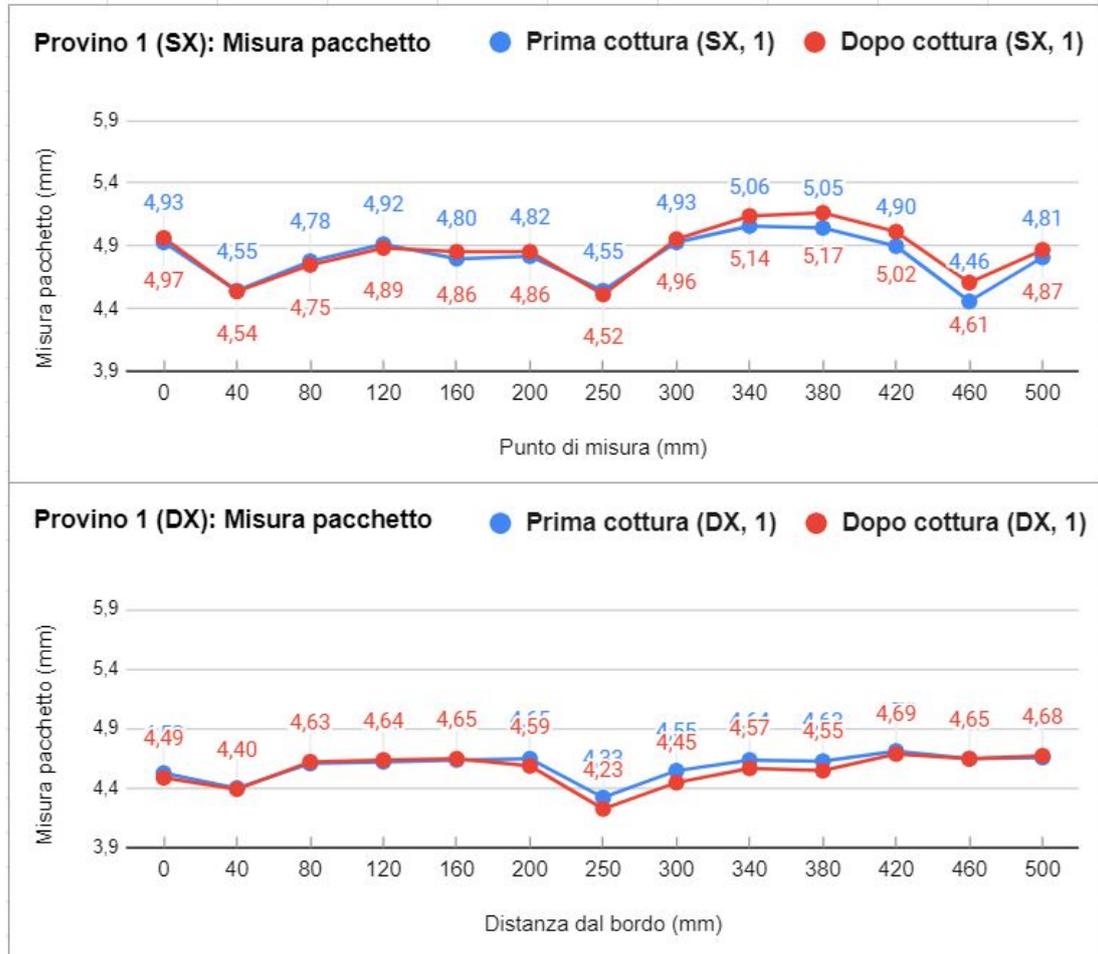


Figura 7.15: Valori medi della misura spessore pacchetto per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

Dopo la cottura dei provini l'adesivo polimerizza (situazione rappresentata in rosso). Anche dopo cottura si riscontrano degli andamenti analoghi alle misure precedenti. Infatti, la posizione dei rivetti rappresenta sempre un minimo locale, mentre, come ci si aspettava, in quasi tutti i punti di misura si riscontrano dei valori inferiori rispetto al caso PC.

Il provino 3, in particolare il lato sinistro, presenta degli andamenti del pacchetto lamiera molto diversi dagli altri. Ciò può essere dovuto ad irregolarità di planarità

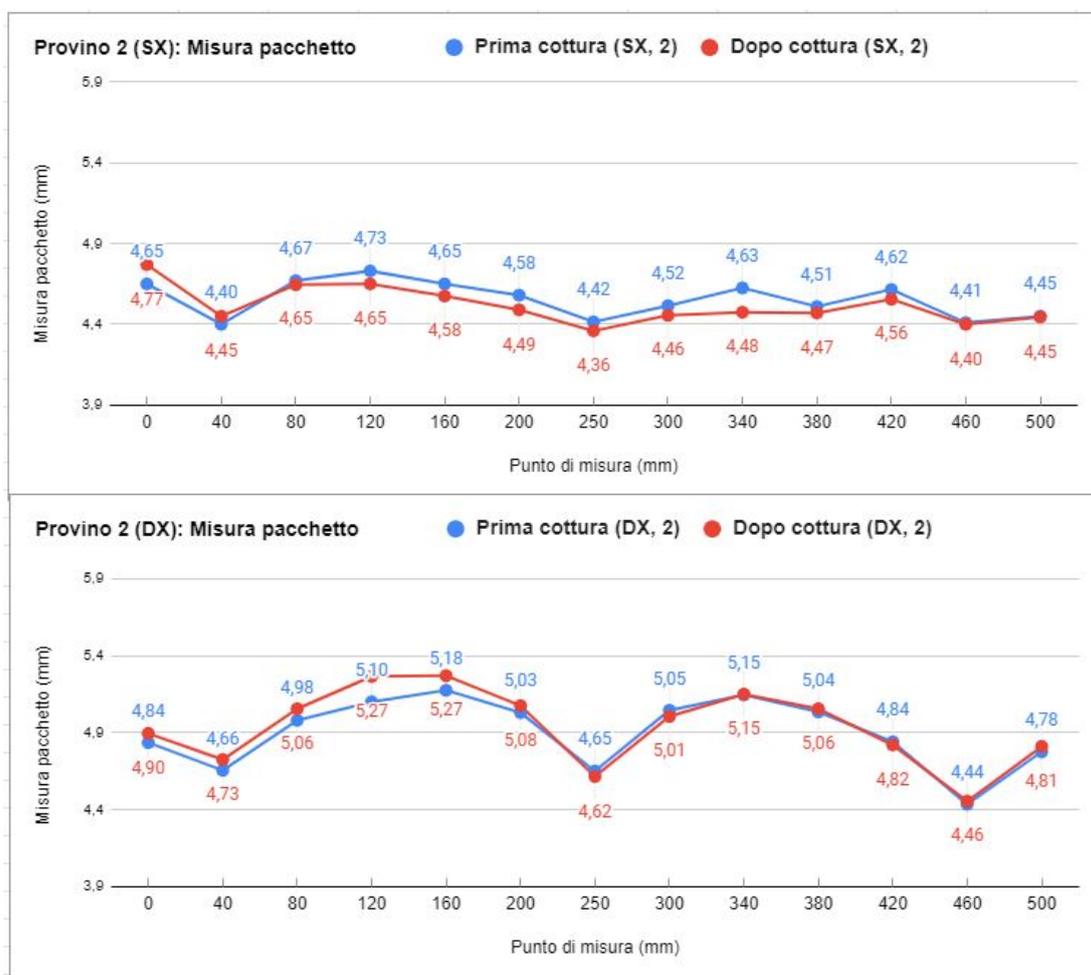


Figura 7.16: Valori medi della misura spessore pacchetto per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

delle lamiera.

I valori misurati del pacchetto lamiera sono stati riportati nelle tabelle della figura 7.18.

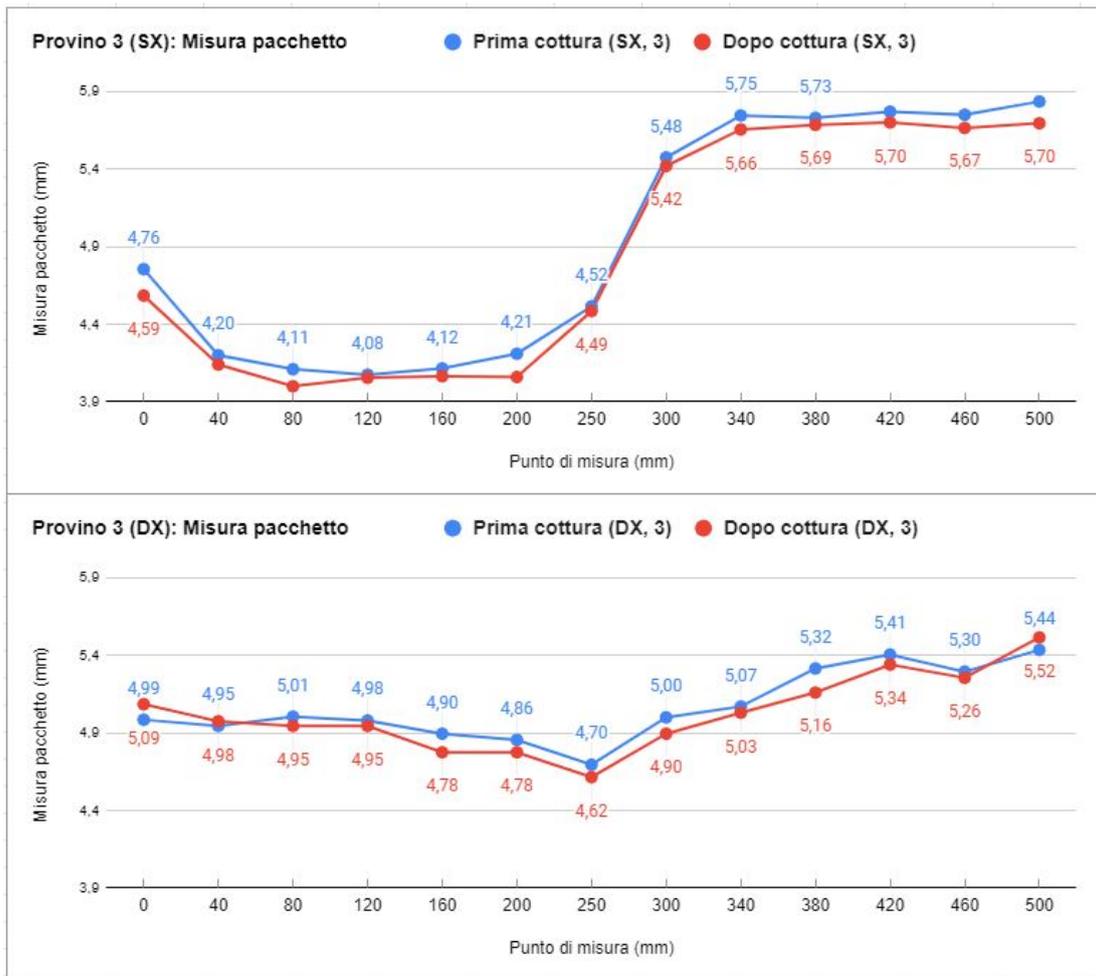


Figura 7.17: Valori medi della misura spessore pacchetto per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

Svolgimento prove di dilatazione termica

		Con calibro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Misura		
			prima cottura	dopo cottura	
1	1	0	SX	4,93	4,97
			DX	4,53	4,49
	2	40	SX	4,55	4,57
			DX	4,41	4,40
	3	80	SX	4,78	4,75
			DX	4,61	4,63
	4	120	SX	4,92	4,89
			DX	4,63	4,64
	5	160	SX	4,80	4,86
			DX	4,64	4,65
	6	200	SX	4,82	4,86
			DX	4,65	4,59
	7	250	SX	4,55	4,52
DX			4,33	4,23	
8	300	SX	4,93	4,96	
		DX	4,55	4,45	
9	340	SX	5,06	5,14	
		DX	4,84	4,57	
10	380	SX	5,05	5,17	
		DX	4,63	4,55	
11	420	SX	4,9	5,02	
		DX	4,72	4,69	
12	460	SX	4,46	4,61	
		DX	4,65	4,65	
13	500	SX	4,81	4,87	
		DX	4,66	4,68	

(a)

		Con calibro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Misura		
			prima cottura	dopo cottura	
2	1	0	SX	4,65	4,77
			DX	4,84	4,90
	2	40	SX	4,40	4,45
			DX	4,66	4,73
	3	80	SX	4,67	4,65
			DX	4,98	5,06
	4	120	SX	4,73	4,65
			DX	5,10	5,27
	5	160	SX	4,65	4,58
			DX	5,18	5,27
	6	200	SX	4,58	4,49
			DX	5,03	5,08
	7	250	SX	4,42	4,36
DX			4,65	4,62	
8	300	SX	4,52	4,46	
		DX	5,05	5,01	
9	340	SX	4,63	4,48	
		DX	5,15	5,15	
10	380	SX	4,51	4,47	
		DX	5,04	5,06	
11	420	SX	4,62	4,56	
		DX	4,84	4,82	
12	460	SX	4,41	4,40	
		DX	4,44	4,46	
13	500	SX	4,45	4,45	
		DX	4,78	4,81	

(b)

		Con calibro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Misura		
			prima cottura	dopo cottura	
3	1	0	SX	4,76	4,59
			DX	4,99	5,09
	2	40	SX	4,21	4,14
			DX	4,95	4,98
	3	80	SX	4,11	4,00
			DX	5,01	4,95
	4	120	SX	4,08	4,06
			DX	4,98	4,95
	5	160	SX	4,12	4,07
			DX	4,90	4,78
	6	200	SX	4,21	4,06
			DX	4,86	4,78
	7	250	SX	4,52	4,49
DX			4,70	4,62	
8	300	SX	5,48	5,42	
		DX	5	4,9	
9	340	SX	5,75	5,66	
		DX	5,07	5,03	
10	380	SX	5,73	5,69	
		DX	5,32	5,16	
11	420	SX	5,77	5,7	
		DX	5,41	5,34	
12	460	SX	5,75	5,67	
		DX	5,30	5,26	
13	500	SX	5,84	5,70	
		DX	5,44	5,52	

(c)

Figura 7.18: Tabelle riassuntive dei valori misurati del pacchetto lamiera: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3. 104

7.3.2 Misura gioco acciaio-alluminio

Le misurazioni seguenti sono state effettuate con lo spessimetro per valutare il gioco tra le lamiere di acciaio e alluminio.

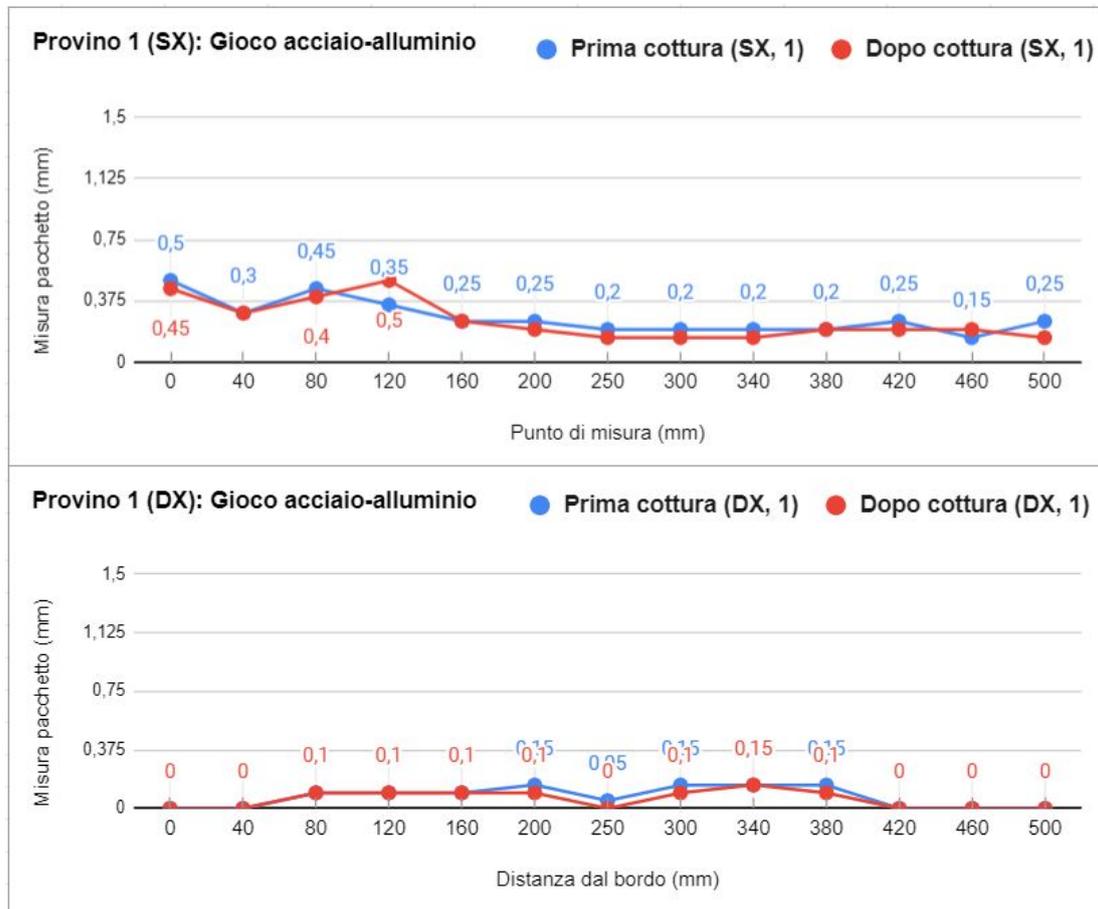


Figura 7.19: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

Si può notare, dagli andamenti delle seguenti figure (figura 7.19 per il primo provino, figura 7.20 per il secondo provino, figura 7.21 per il terzo provino) e dai valori misurati riportati nella figura 7.22, come i valori del gioco tra un punto e il successivo sono più contenuti e prossimi tra di loro. Inoltre i valori DC risultano essere inferiori o, in pochi punti, leggermente superiori al valore PC. Questo sta a significare che le dilatazioni tra acciaio sono state compensate dall'azione dell'adesivo.

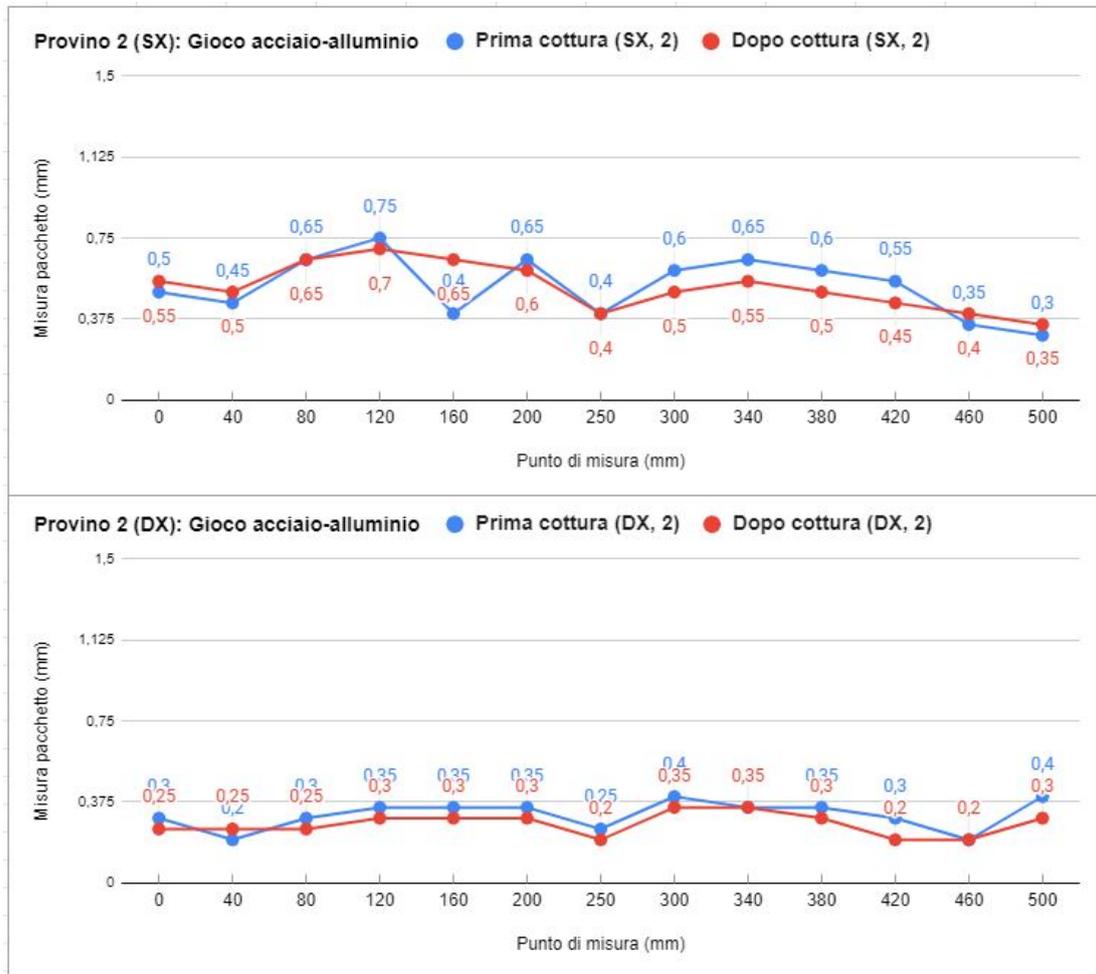


Figura 7.20: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

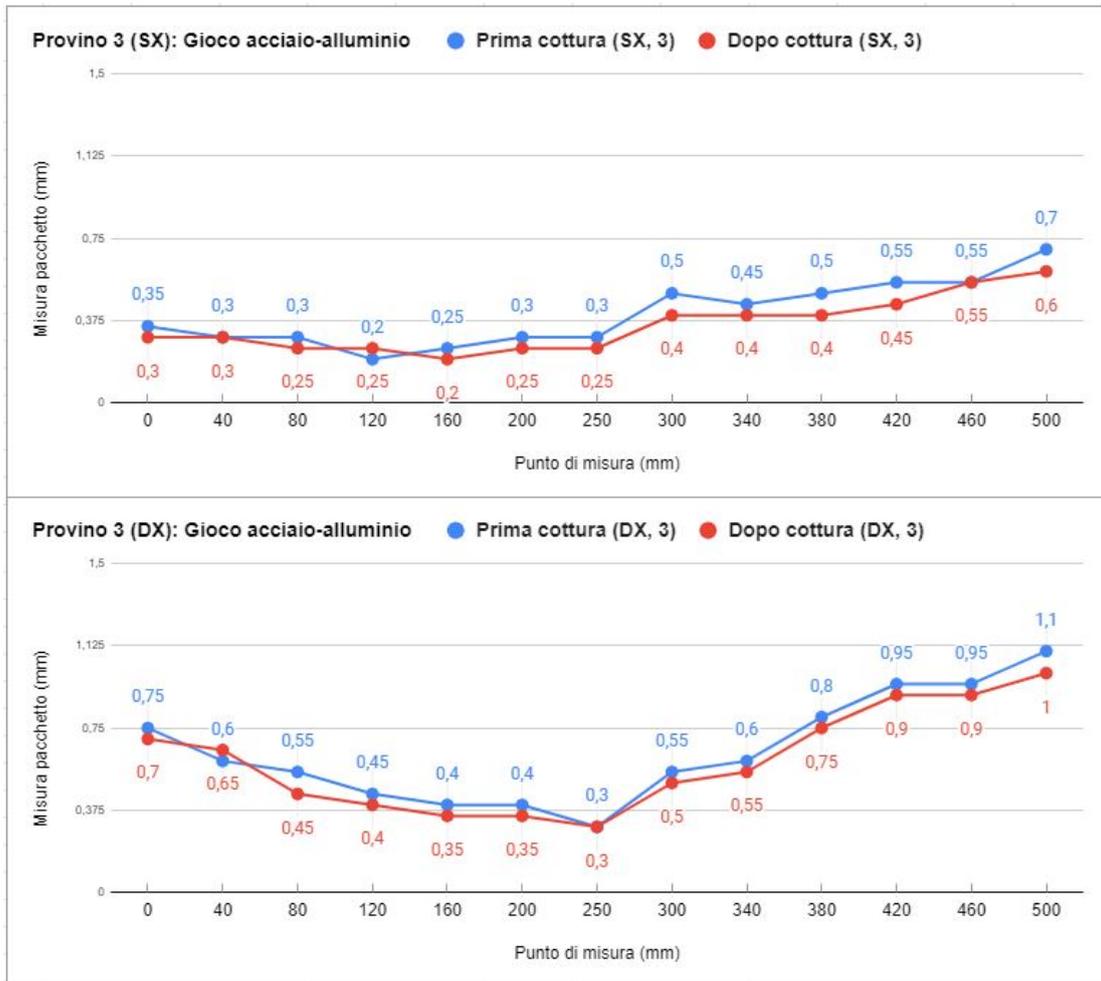


Figura 7.21: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

Svolgimento prove di dilatazione termica

		Con spessimetro		
N°	Punto (mm)		Gioco acciaio-alluminio	Gioco acciaio-alluminio
			prima cottura	dopo cottura
P R O V I N O 1	1	SX	0,50	0,45
		DX	0,00	0,00
	2	SX	0,30	0,30
		DX	0,00	0,00
	3	SX	0,45	0,40
		DX	0,10	0,10
	4	SX	0,35	0,50
		DX	0,10	0,10
	5	SX	0,25	0,25
		DX	0,10	0,10
	6	SX	0,25	0,20
		DX	0,15	0,10
	7	SX	0,20	0,15
DX		0,05	0,00	
8	SX	0,2	0,15	
	DX	0,15	0,1	
9	SX	0,2	0,15	
	DX	0,15	0,15	
10	SX	0,2	0,2	
	DX	0,15	0,1	
11	SX	0,25	0,2	
	DX	0,00	0,00	
12	SX	0,15	0,20	
	DX	0,00	0,00	
13	SX	0,25	0,15	
	DX	0,00	0,00	

(a)

		Con spessimetro		
N°	Punto (mm)		Gioco acciaio-alluminio	Gioco acciaio-alluminio
			prima cottura	dopo cottura
P R O V I N O 2	1	SX	0,50	0,55
		DX	0,30	0,25
	2	SX	0,45	0,50
		DX	0,20	0,25
	3	SX	0,65	0,65
		DX	0,30	0,25
	4	SX	0,75	0,70
		DX	0,35	0,30
	5	SX	0,40	0,65
		DX	0,35	0,30
	6	SX	0,65	0,60
		DX	0,35	0,30
	7	SX	0,40	0,40
DX		0,25	0,20	
8	SX	0,6	0,5	
	DX	0,4	0,35	
9	SX	0,65	0,55	
	DX	0,35	0,35	
10	SX	0,6	0,5	
	DX	0,35	0,3	
11	SX	0,55	0,45	
	DX	0,30	0,20	
12	SX	0,35	0,40	
	DX	0,20	0,20	
13	SX	0,30	0,35	
	DX	0,40	0,30	

(b)

		Con spessimetro		
N°	Punto (mm)		Gioco acciaio-alluminio	Gioco acciaio-alluminio
			prima cottura	dopo cottura
P R O V I N O 3	1	SX	0,35	0,30
		DX	0,75	0,70
	2	SX	0,30	0,30
		DX	0,60	0,65
	3	SX	0,30	0,25
		DX	0,55	0,45
	4	SX	0,20	0,25
		DX	0,45	0,40
	5	SX	0,25	0,20
		DX	0,40	0,35
	6	SX	0,30	0,25
		DX	0,40	0,35
	7	SX	0,30	0,25
DX		0,30	0,30	
8	SX	0,5	0,4	
	DX	0,55	0,5	
9	SX	0,45	0,4	
	DX	0,6	0,55	
10	SX	0,5	0,4	
	DX	0,8	0,75	
11	SX	0,55	0,45	
	DX	0,95	0,90	
12	SX	0,55	0,55	
	DX	0,95	0,90	
13	SX	0,70	0,60	
	DX	1,10	1,00	

(c)

Figura 7.22: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

7.3.3 Misura gioco alluminio-alluminio

Le misure effettuate su i campioni realizzati con l'adesivo per i giunti ibridi terminano con la misurazione del gioco tra le due lamiere di alluminio.

Gli andamenti dei valori medi per ogni punto sono mostrati in figura 7.23 (provino 1), figura 7.24 (provino 2) e figura 7.25 (provino 3).

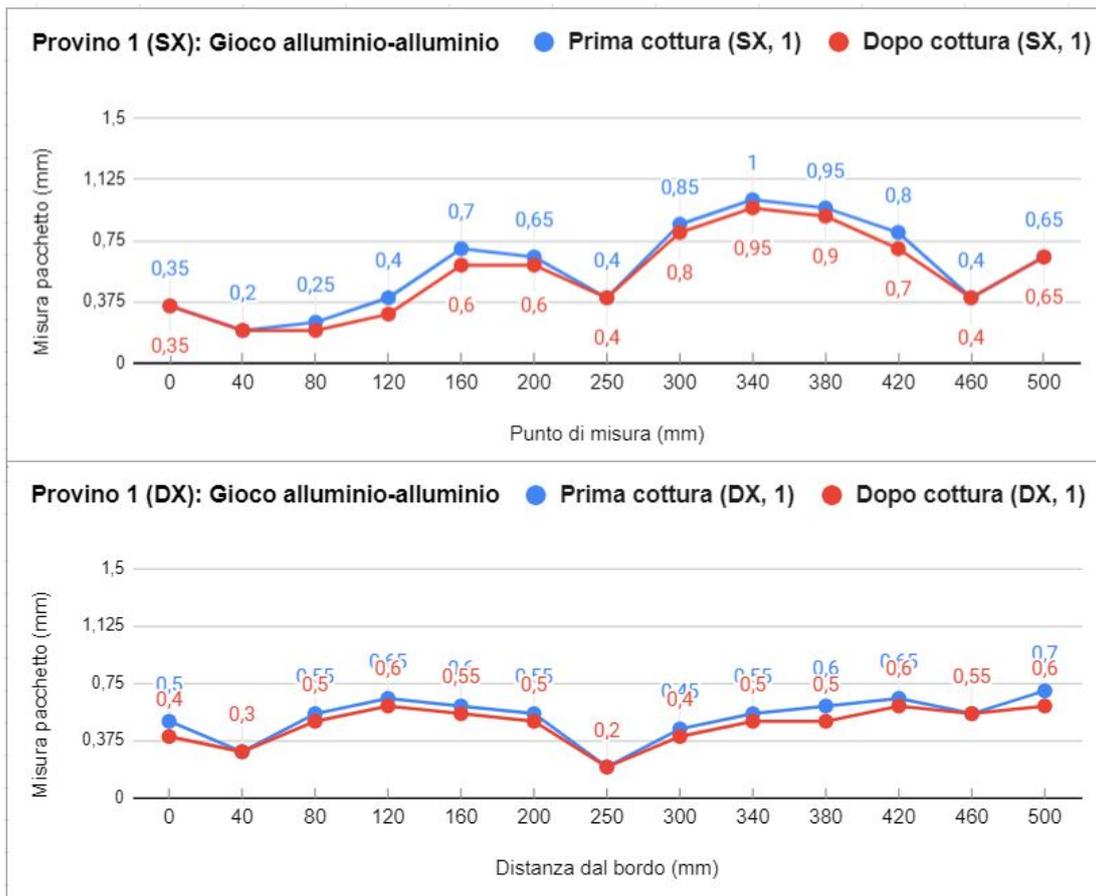


Figura 7.23: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

Anche in questi casi la situazione tra gli andamenti prima cottura (in blu) e dopo cottura (in rosso) sono abbastanza simili tra loro. Si possono notare dei valori di minimo e nulli in corrispondenza dei rivetti e in generale i valori DC risultano inferiori al caso PC.

Il provino 3 lato sinistro, come negli andamenti del pacchetto lamiera, mostra delle irregolarità rispetto agli altri provini. Si potrebbe pensare che la planarità

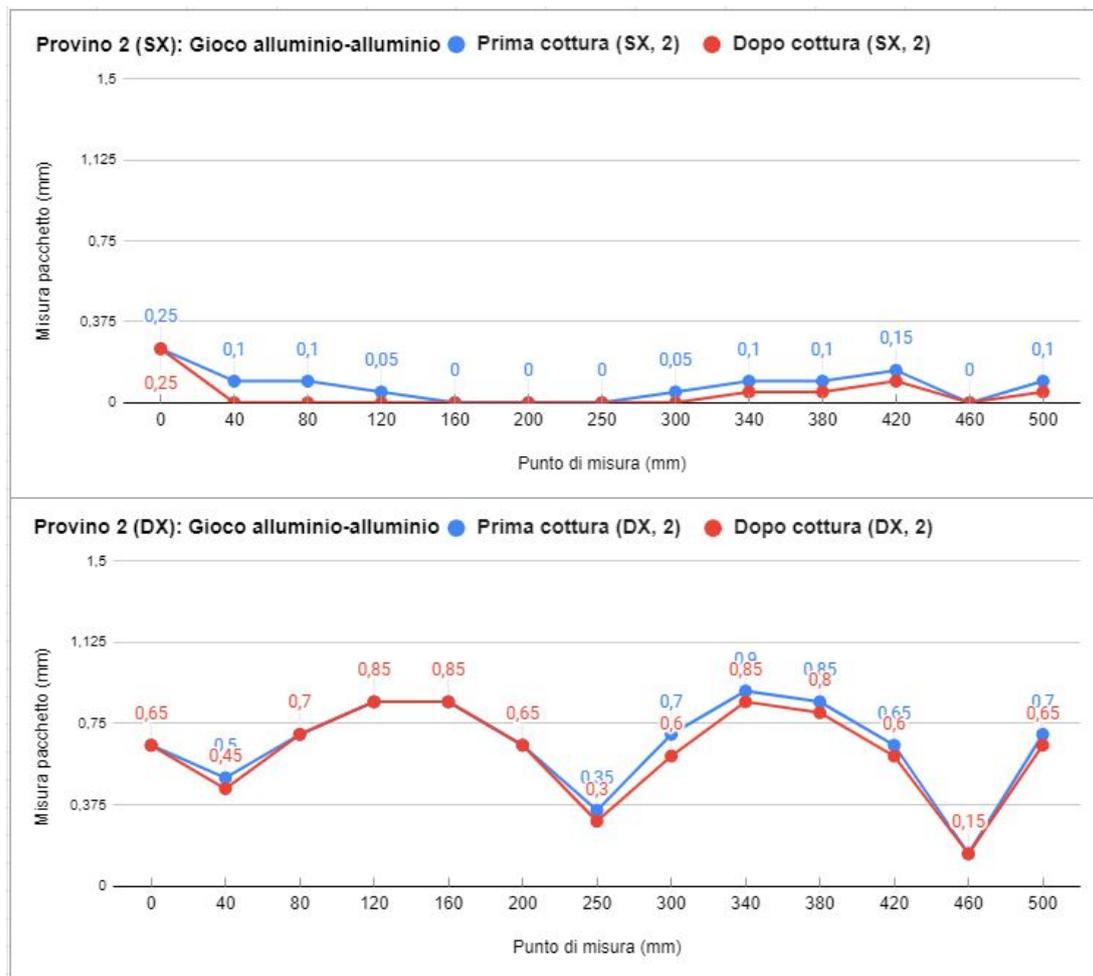


Figura 7.24: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

non costante della lamiera sia proprio oltre il rivetto centrale, e ciò ha come effetto conseguente un cattivo funzionamento dell'ultimo rivetto.

I valori del gioco tra le lamiere in alluminio sono riportati nelle seguenti tabelle (figura 7.26).

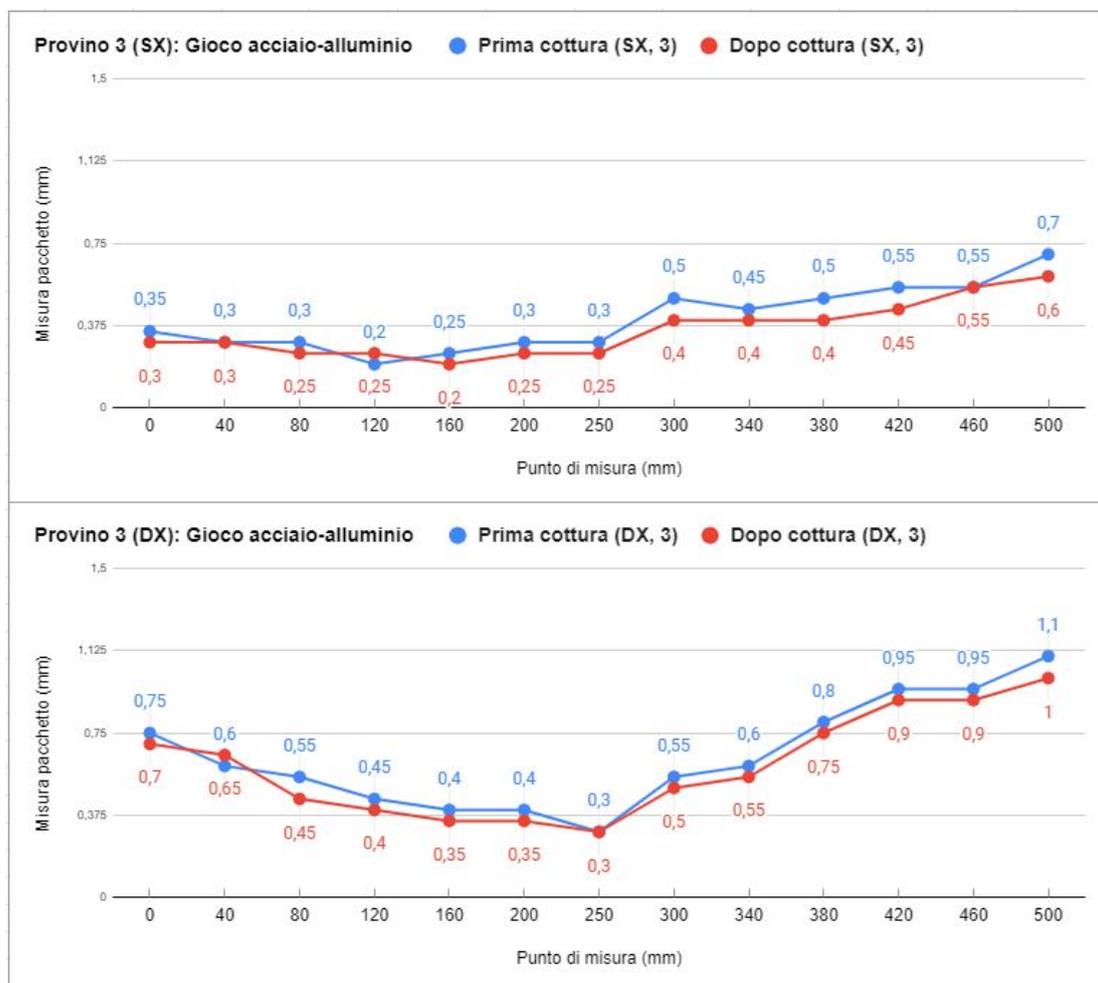


Figura 7.25: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

Svolgimento prove di dilatazione termica

P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Con spessimetro		
			Gioco alluminio-alluminio prima cottura	Gioco alluminio-alluminio dopo cottura	
1	1	0	SX	0,35	0,35
			DX	0,5	0,4
	2	40	SX	0,2	0,2
			DX	0,3	0,3
	3	80	SX	0,25	0,2
			DX	0,55	0,5
	4	120	SX	0,4	0,3
			DX	0,65	0,6
	5	160	SX	0,7	0,6
			DX	0,6	0,55
	6	200	SX	0,65	0,6
			DX	0,55	0,5
	7	250	SX	0,4	0,4
DX			0,2	0,2	
8	300	SX	0,85	0,8	
		DX	0,45	0,4	
9	340	SX	1	0,95	
		DX	0,55	0,5	
10	380	SX	0,95	0,9	
		DX	0,6	0,5	
11	420	SX	0,8	0,7	
		DX	0,65	0,6	
12	460	SX	0,4	0,4	
		DX	0,55	0,55	
13	500	SX	0,65	0,65	
		DX	0,7	0,6	

(a)

P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Con spessimetro		
			Gioco alluminio-alluminio prima cottura	Gioco alluminio-alluminio dopo cottura	
2	1	0	SX	0,25	0,25
			DX	0,65	0,65
	2	40	SX	0,1	0
			DX	0,5	0,45
	3	80	SX	0,1	0
			DX	0,7	0,7
	4	120	SX	0,05	0
			DX	0,85	0,85
	5	160	SX	0	0
			DX	0,85	0,85
	6	200	SX	0	0
			DX	0,65	0,65
	7	250	SX	0	0
DX			0,35	0,3	
8	300	SX	0,05	0	
		DX	0,7	0,6	
9	340	SX	0,1	0,05	
		DX	0,9	0,85	
10	380	SX	0,1	0,05	
		DX	0,85	0,8	
11	420	SX	0,15	0,1	
		DX	0,65	0,6	
12	460	SX	0	0	
		DX	0,15	0,15	
13	500	SX	0,1	0,05	
		DX	0,2	0,65	

(b)

P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Con spessimetro		
			Gioco alluminio-alluminio prima cottura	Gioco alluminio-alluminio dopo cottura	
3	1	0	SX	0,35	0,25
			DX	0,6	0,4
	2	40	SX	0	0
			DX	0,35	0,35
	3	80	SX	0	0
			DX	0,65	0,5
	4	120	SX	0	0
			DX	0,7	0,55
	5	160	SX	0	0
			DX	0,55	0,4
	6	200	SX	0	0
			DX	0,5	0,4
	7	250	SX	0,1	0,15
DX			0,35	0,3	
8	300	SX	0,9	0,8	
		DX	0,4	0,3	
9	340	SX	1,25	0,9	
		DX	0,45	0,35	
10	380	SX	1,15	1,15	
		DX	0,4	0,25	
11	420	SX	1,1	1,15	
		DX	0,35	0,2	
12	460	SX	1,05	1,05	
		DX	0,15	0,1	
13	500	SX	1,35	1,15	
		DX	0,35	0,25	

(c)

Figura 7.26: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

7.4 Caso studio: Betamate 1424

L'adesivo *Betamate 1424*, specifico per i giunti in acciaio, è stato utilizzato per la realizzazione di altri provini. Nonostante la non specificità dell'adesivo con l'alluminio, questo è stato applicato anche nell'interfaccia tra alluminio e acciaio. Questo ha permesso di valutare eventuali effetti, positivi o negativi, nell'utilizzo dell'adesivo con l'alluminio, al fine di delineare delle linee guida per la progettazione dei giunti ibridi e la ricerca della migliore configurazione di questi.

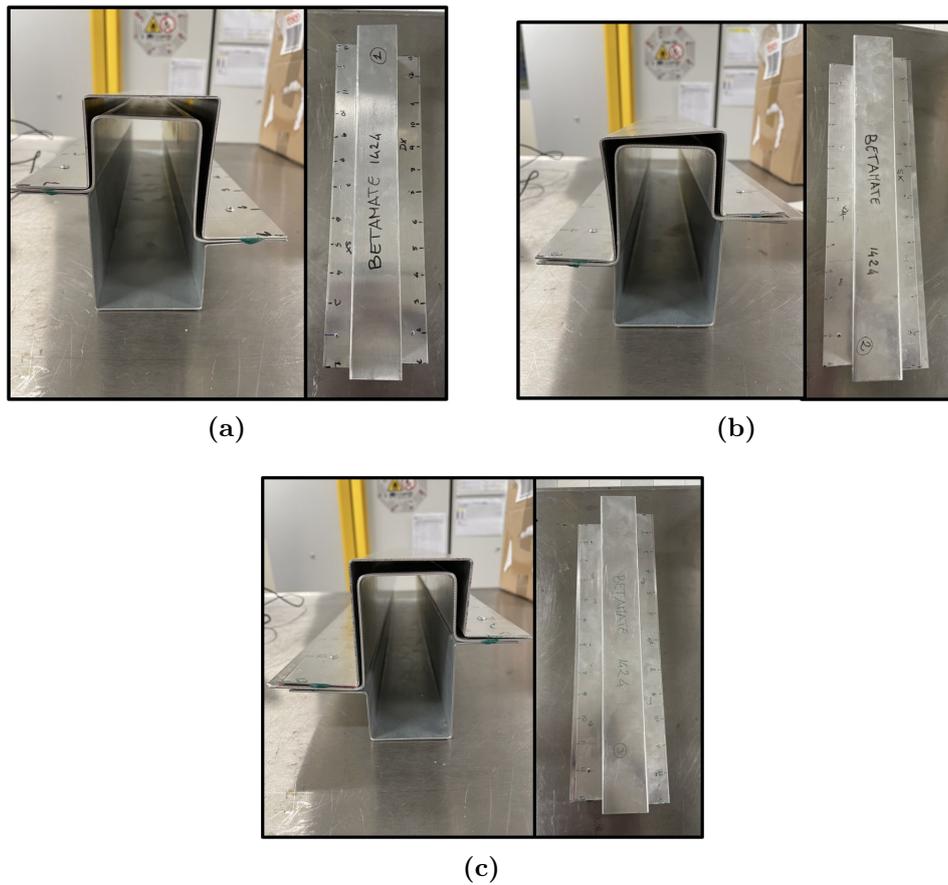


Figura 7.27: Sezione e vista dall'alto dei provini realizzati con Betamate 1424: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

7.4.1 Misura pacchetto lamiera

Nelle figure seguenti, figura 7.28 per il provino 1, figura 7.29 per il provino 2, figura 7.30 per il provino 3, sono mostrati i risultati grafici delle misurazioni ottenute del

pacchetto lamiera dei provini. In blu è rappresentata la situazione prima cottura, sia per il lato sinistro e destro dei provini, mentre in rosso è stata rappresentata la situazione dopo cottura che ci aspettiamo essere migliorativa.

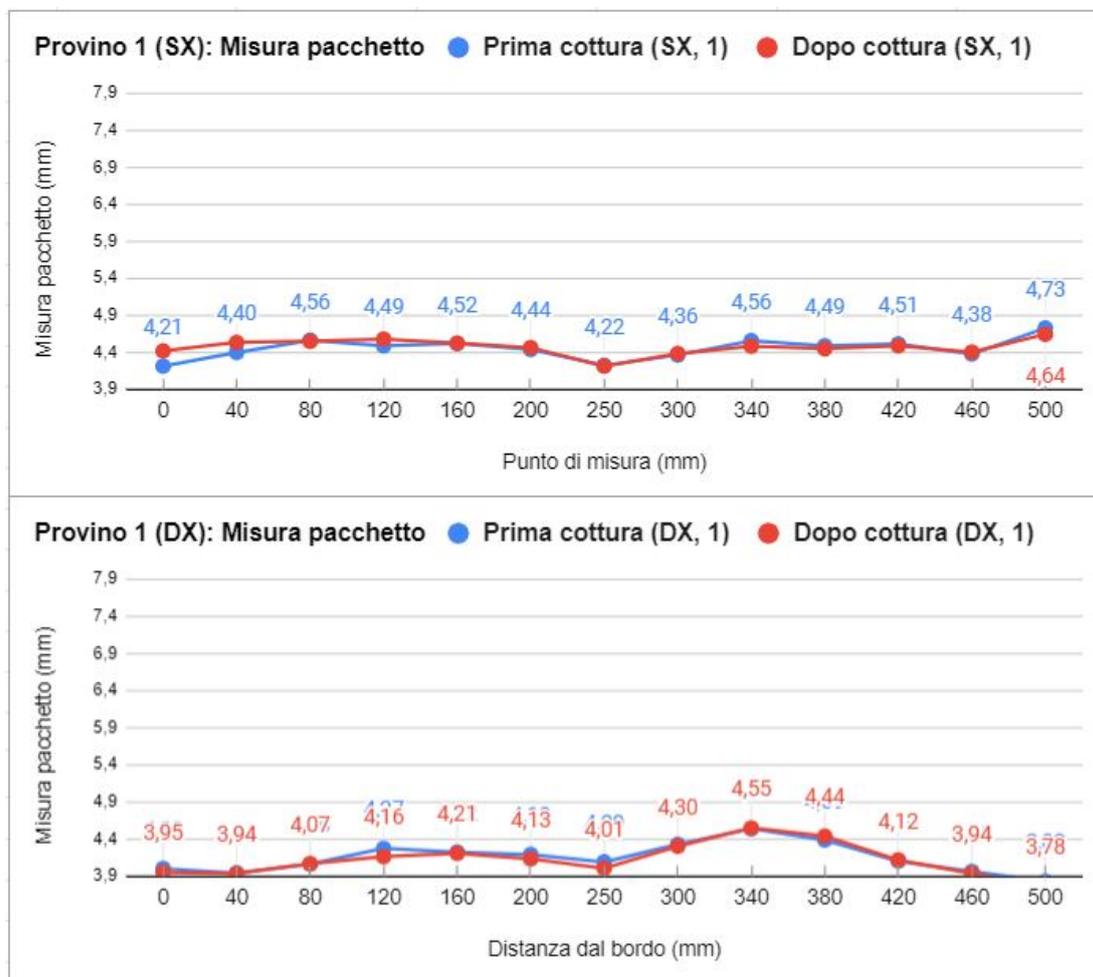


Figura 7.28: Valori medi della misura spessore pacchetto per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

Osservando gli andamenti delle misure del pacchetto lamiera, o i valori riportati nelle tabelle della figura 7.31, possiamo osservare degli andamenti simili tra prima cottura e dopo cottura. Soffermandoci sui valori PC questi sono, per ogni punto, simili tra loro specialmente nel lato sinistro dei provini. Questo può essere sinonimo di una migliore planarità delle interfacce della lamiera. Per quanto riguarda i valori DC questi sono sempre inferiori alla situazione PC.

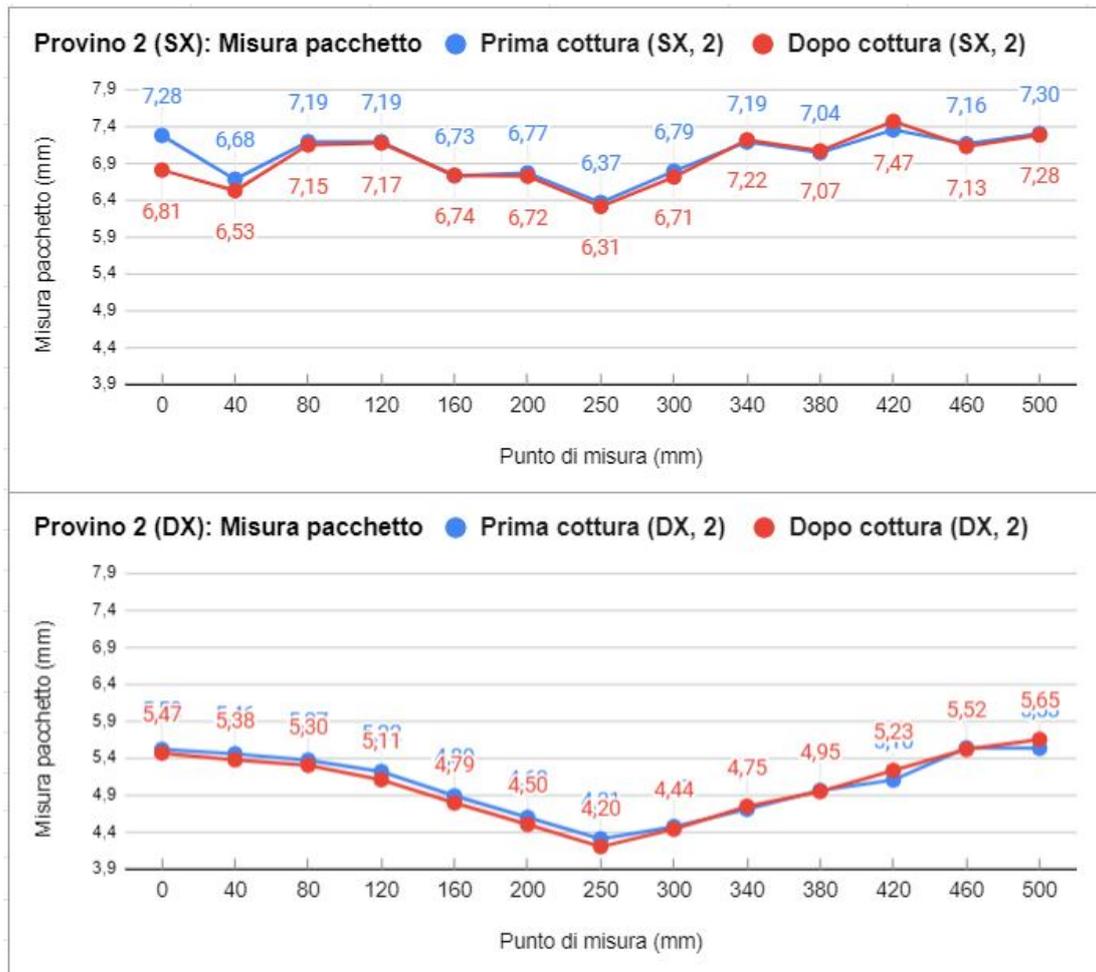


Figura 7.29: Valori medi della misura spessore pacchetto per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

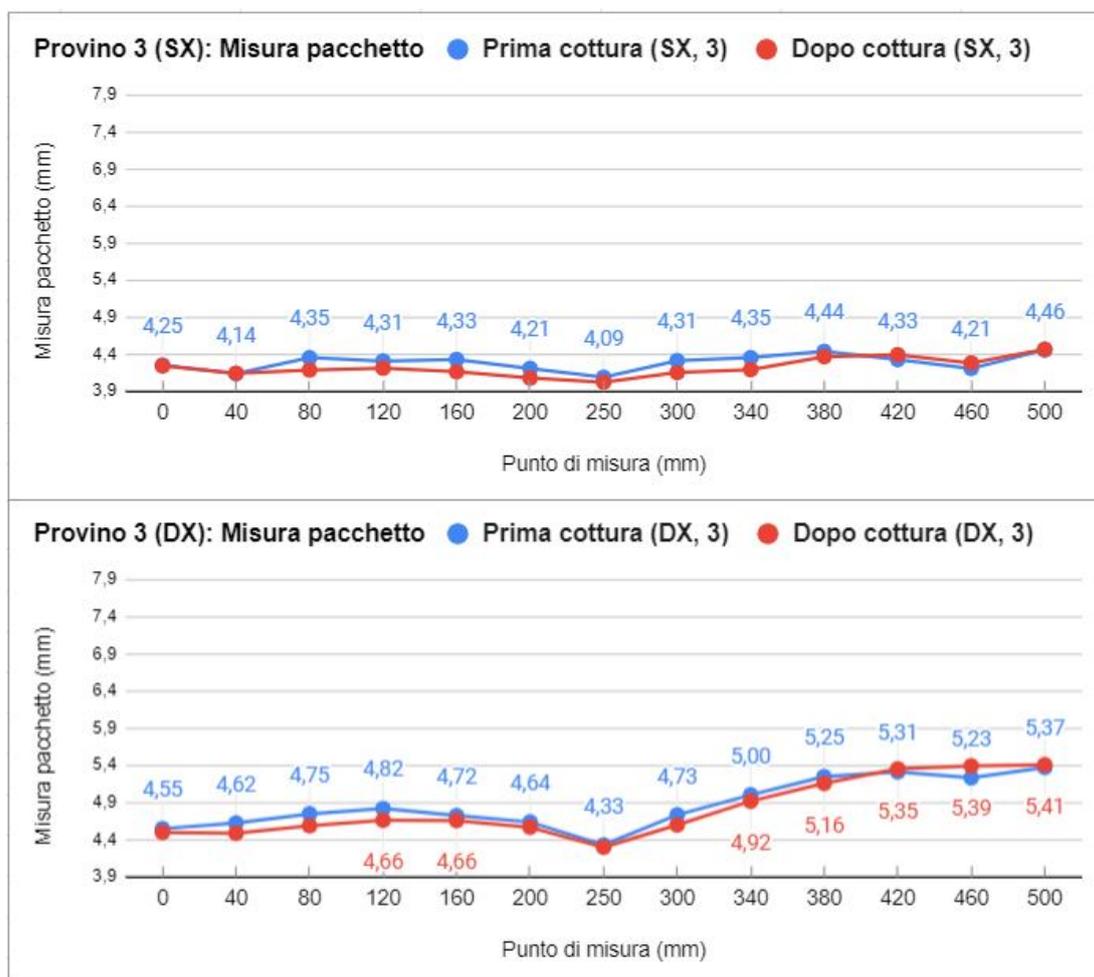


Figura 7.30: Valori medi della misura spessore pacchetto per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

7.4 – Caso studio: Betamate 1424

		Con calibro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)		Misura prima	Misura dopo
				cottura	cottura
1	1	0	SX	4,21	4,42
			DX	4,00	3,95
	2	40	SX	4,40	4,53
			DX	3,94	3,94
	3	80	SX	4,56	4,55
			DX	4,06	4,07
	4	120	SX	4,49	4,58
			DX	4,27	4,16
	5	160	SX	4,52	4,52
			DX	4,22	4,21
	6	200	SX	4,44	4,46
			DX	4,19	4,13
	7	250	SX	4,22	4,21
DX			4,09	4,01	
8	300	SX	4,36	4,38	
		DX	4,33	4,3	
9	340	SX	4,56	4,48	
		DX	4,54	4,55	
10	380	SX	4,49	4,45	
		DX	4,39	4,44	
11	420	SX	4,51	4,49	
		DX	4,10	4,12	
12	460	SX	4,38	4,40	
		DX	3,96	3,94	
13	500	SX	4,73	4,64	
		DX	3,83	3,78	

(a)

		Con calibro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)		Misura prima	Misura dopo
				cottura	cottura
2	1	0	SX	7,28	6,81
			DX	5,52	5,47
	2	40	SX	6,68	6,53
			DX	5,46	5,38
	3	80	SX	7,19	7,15
			DX	5,37	5,30
	4	120	SX	7,19	7,17
			DX	5,22	5,11
	5	160	SX	6,73	6,74
			DX	4,89	4,79
	6	200	SX	6,77	6,72
			DX	4,60	4,50
	7	250	SX	6,37	6,31
DX			4,31	4,20	
8	300	SX	6,79	6,71	
		DX	4,47	4,44	
9	340	SX	7,19	7,22	
		DX	4,71	4,75	
10	380	SX	7,04	7,07	
		DX	4,96	4,95	
11	420	SX	7,35	7,47	
		DX	5,10	5,23	
12	460	SX	7,16	7,13	
		DX	5,54	5,52	
13	500	SX	7,30	7,28	
		DX	5,53	5,65	

(b)

		Con calibro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)		Misura prima	Misura dopo
				cottura	cottura
3	1	0	SX	4,25	4,24
			DX	4,55	4,50
	2	40	SX	4,14	4,14
			DX	4,62	4,49
	3	80	SX	4,35	4,19
			DX	4,75	4,59
	4	120	SX	4,31	4,21
			DX	4,82	4,66
	5	160	SX	4,33	4,16
			DX	4,72	4,66
	6	200	SX	4,21	4,08
			DX	4,64	4,57
	7	250	SX	4,09	4,02
DX			4,33	4,30	
8	300	SX	4,31	4,15	
		DX	4,73	4,6	
9	340	SX	4,35	4,19	
		DX	5	4,92	
10	380	SX	4,44	4,37	
		DX	5,25	5,16	
11	420	SX	4,33	4,39	
		DX	5,31	5,35	
12	460	SX	4,21	4,28	
		DX	5,23	5,39	
13	500	SX	4,46	4,47	
		DX	5,37	5,41	

(c)

Figura 7.31: Tabelle riassuntive dei valori misurati del pacchetto lamiera: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

7.4.2 Misura gioco acciaio-alluminio

Le misurazioni che saranno presentate di seguito rappresentano il gioco rilevato all'interfaccia tra l'acciaio e l'alluminio.

Gli andamenti delle misure sono riportati nelle figure seguenti (figura 7.32 per il provino 1, figura 7.33 per il provino 2, figura 7.34 per il provino 3), mentre i valori medi per ogni punto sono raccolti nelle tabelle della figura 7.35.

Gli andamenti del gioco tra acciaio e alluminio risultano abbastanza analoghi tra loro e in particolare le misure DC sono inferiori al caso PC.

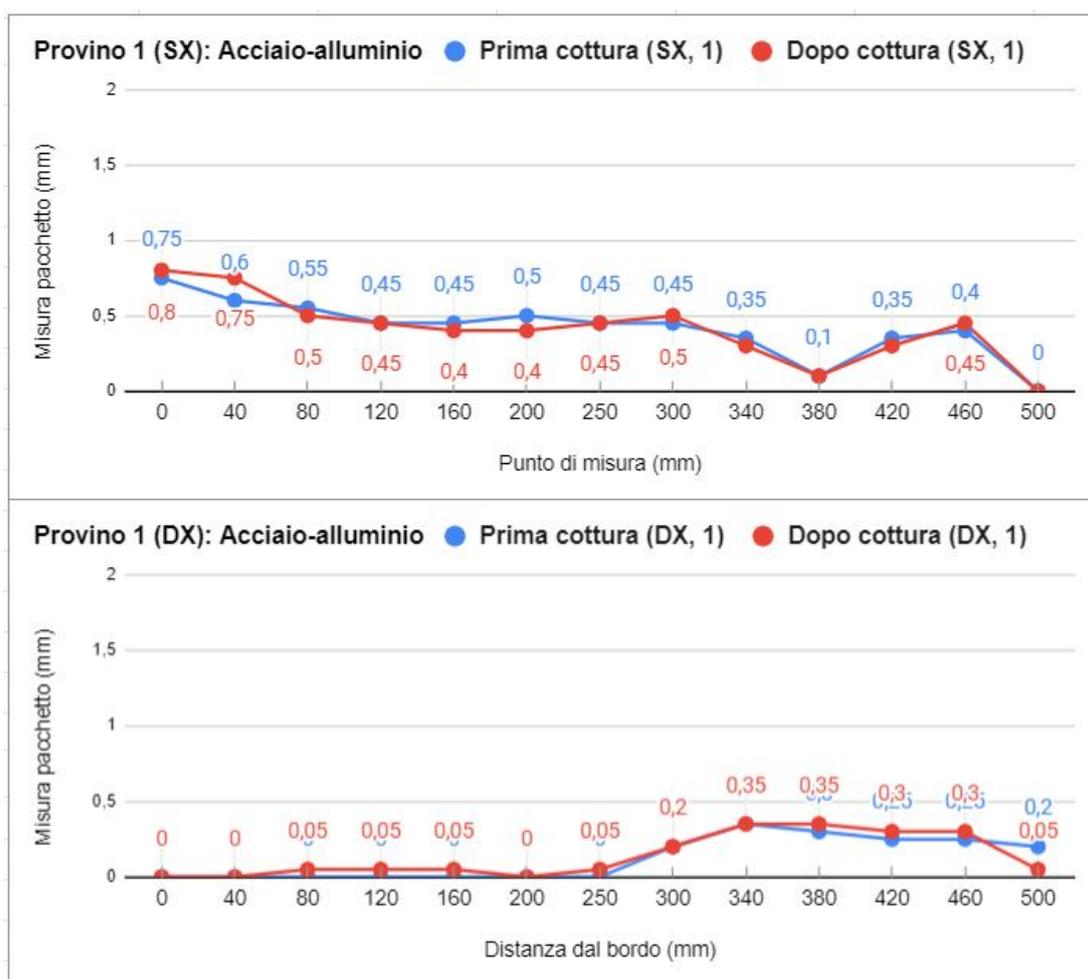


Figura 7.32: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

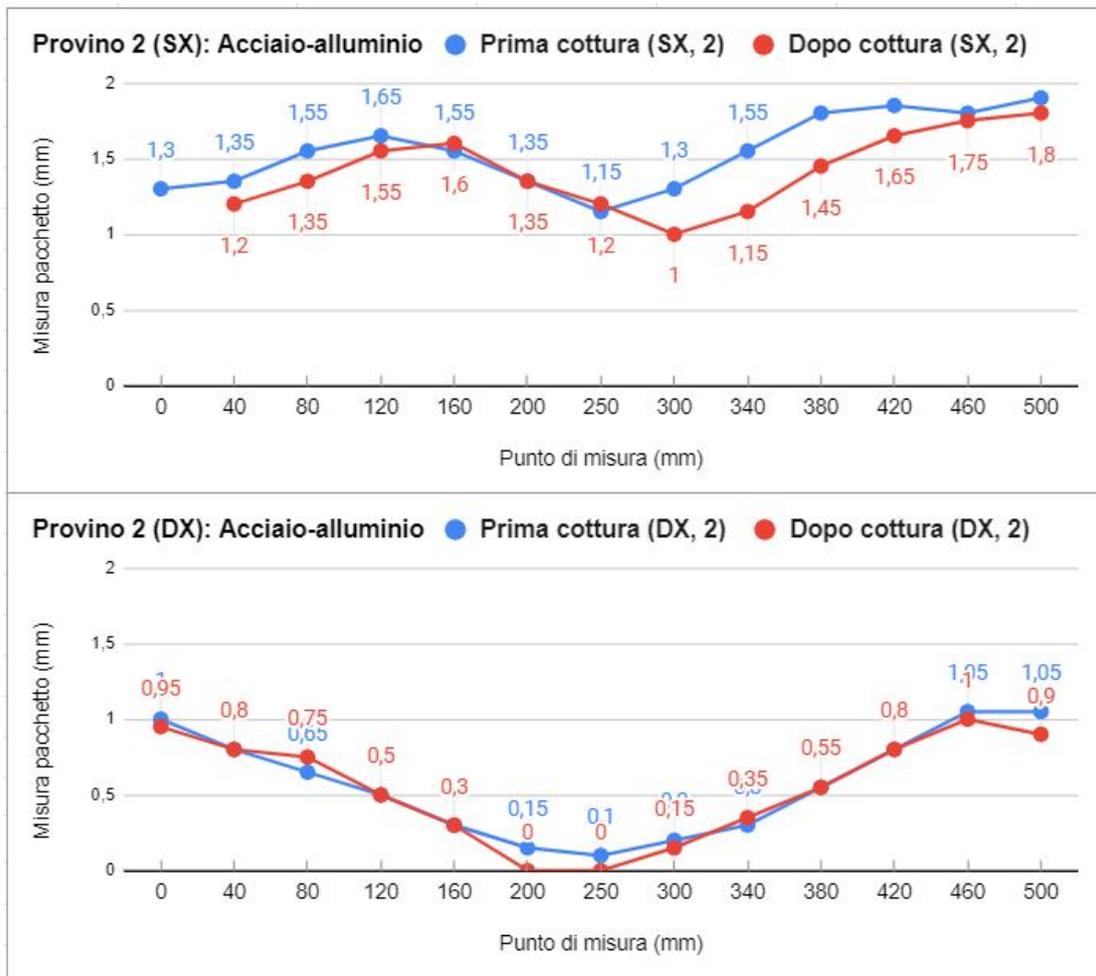


Figura 7.33: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

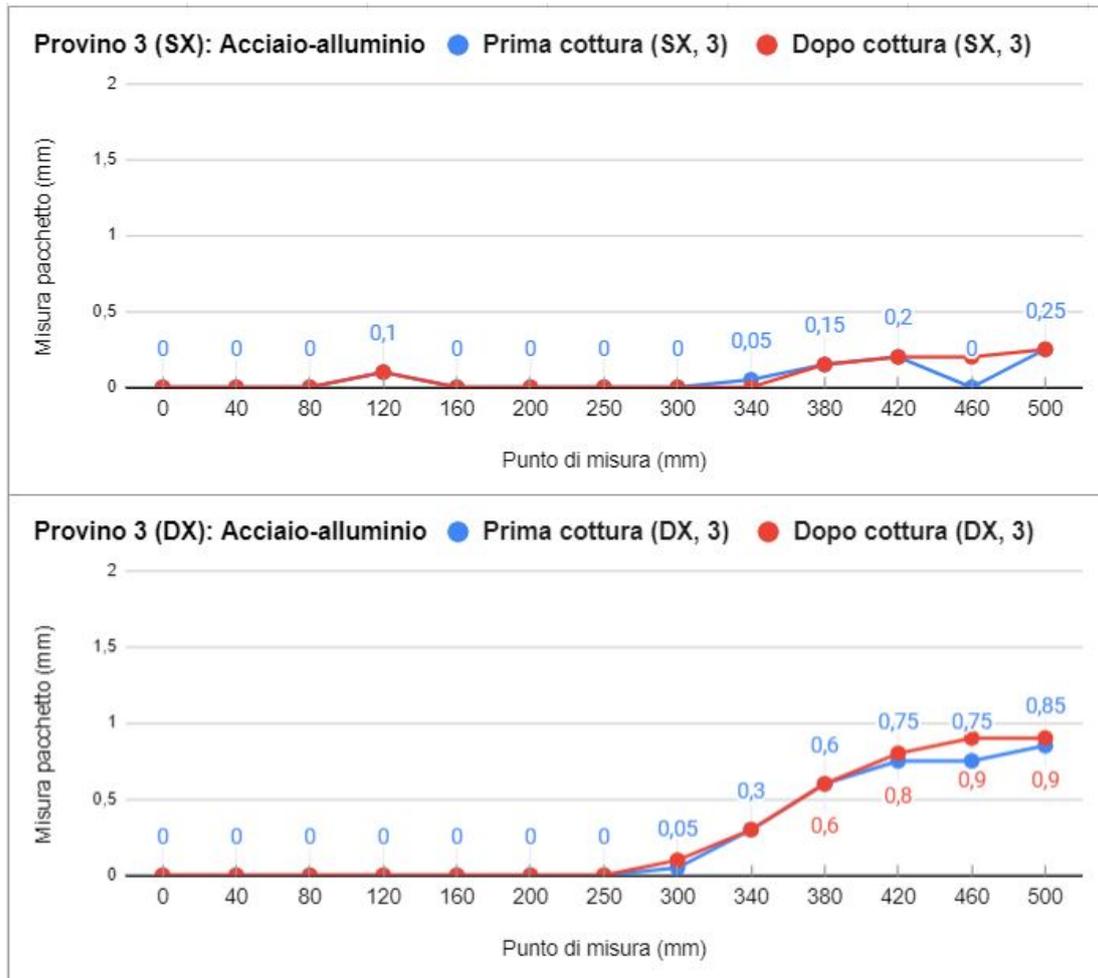


Figura 7.34: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

P R O V I N O	1	N°	Punto (mm)	Con spessimetro			
				SX	DX	Gioco	Gioco
						acciaio-alluminio prima cottura	acciaio-alluminio dopo cottura
1	0	SX	DX	0,75	0,80		
				0,00	0,00		
2	40	SX	DX	0,60	0,75		
				0,00	0,00		
3	80	SX	DX	0,55	0,50		
		SX	DX	0,00	0,05		
		SX	DX	0,45	0,45		
4	120	SX	DX	0,00	0,05		
		SX	DX	0,45	0,40		
5	160	SX	DX	0,00	0,05		
		SX	DX	0,50	0,40		
6	200	SX	DX	0,00	0,00		
		SX	DX	0,45	0,45		
7	250	SX	DX	0,00	0,05		
		SX	DX	0,45	0,5		
8	300	SX	DX	0,2	0,2		
		SX	DX	0,35	0,3		
9	340	SX	DX	0,35	0,35		
		SX	DX	0,1	0,1		
10	380	SX	DX	0,3	0,35		
		SX	DX	0,35	0,3		
11	420	SX	DX	0,25	0,30		
		SX	DX	0,40	0,45		
12	460	SX	DX	0,25	0,30		
		SX	DX	0,00	0,00		
13	500	SX	DX	0,20	0,05		

(a)

P R O V I N O	2	N°	Punto (mm)	Con spessimetro			
				SX	DX	Gioco	Gioco
						acciaio-alluminio prima cottura	acciaio-alluminio dopo cottura
1	0	SX	DX	1,30	1,20		
				1,00	0,95		
2	40	SX	DX	1,35	1,35		
				0,80	0,80		
3	80	SX	DX	1,55	1,55		
		SX	DX	0,65	0,75		
		SX	DX	1,65	1,60		
4	120	SX	DX	0,50	0,50		
		SX	DX	1,55	1,35		
5	160	SX	DX	0,30	0,30		
		SX	DX	1,35	1,20		
6	200	SX	DX	0,15	0,00		
		SX	DX	1,15	1,00		
7	250	SX	DX	0,10	0,00		
		SX	DX	1,3	1,15		
8	300	SX	DX	0,2	0,15		
		SX	DX	1,55	1,45		
9	340	SX	DX	0,3	0,35		
		SX	DX	1,8	1,65		
10	380	SX	DX	0,55	0,55		
		SX	DX	1,85	1,75		
11	420	SX	DX	0,80	0,80		
		SX	DX	1,80	1,80		
12	460	SX	DX	1,05	1,00		
		SX	DX	1,90	1,80		
13	500	SX	DX	1,05	0,90		

(b)

P R O V I N O	3	N°	Punto (mm)	Con spessimetro			
				SX	DX	Gioco	Gioco
						acciaio-alluminio prima cottura	acciaio-alluminio dopo cottura
1	0	SX	DX	0,00	0,00		
				0,00	0,00		
2	40	SX	DX	0,00	0,00		
				0,00	0,00		
3	80	SX	DX	0,00	0,00		
		SX	DX	0,10	0,10		
		SX	DX	0,00	0,00		
4	120	SX	DX	0,00	0,00		
		SX	DX	0,00	0,00		
5	160	SX	DX	0,00	0,00		
		SX	DX	0,00	0,00		
6	200	SX	DX	0,00	0,00		
		SX	DX	0,00	0,00		
7	250	SX	DX	0,00	0,00		
		SX	DX	0,00	0,00		
8	300	SX	DX	0	0		
		SX	DX	0,05	0,1		
		SX	DX	0,05	0		
9	340	SX	DX	0,3	0,3		
		SX	DX	0,15	0,15		
10	380	SX	DX	0,6	0,6		
		SX	DX	0,2	0,2		
11	420	SX	DX	0,75	0,80		
		SX	DX	0,00	0,20		
12	460	SX	DX	0,75	0,90		
		SX	DX	0,25	0,25		
13	500	SX	DX	0,85	0,90		

(c)

Figura 7.35: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

7.4.3 Misura gioco alluminio-alluminio

Le misurazioni che saranno presentate di seguito rappresentano il gioco tra le due interfacce di alluminio.

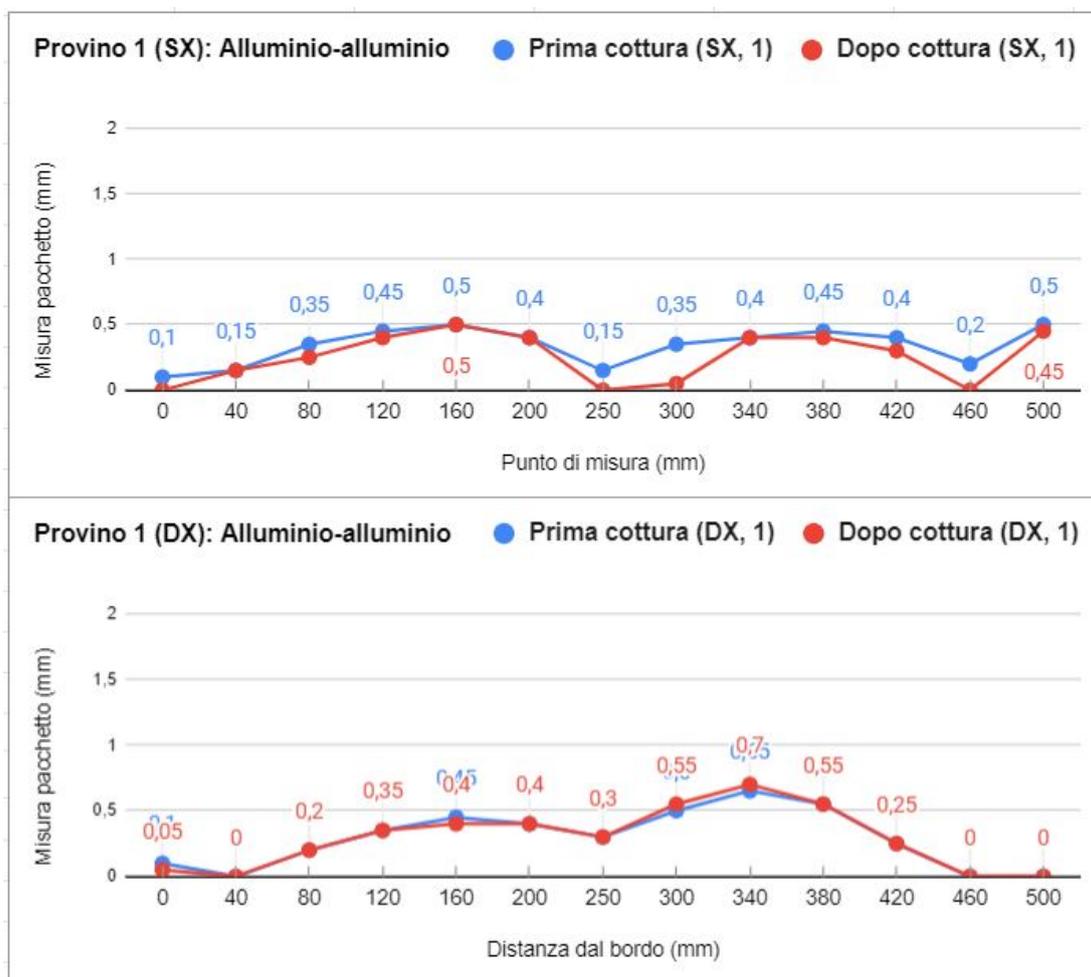


Figura 7.36: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il primo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

In figura sono rappresentati i valori misurati, per il provino 1 figura 7.36, per il provino 2 figura 7.37, per il provino 3 figura 7.38. Anche in questi casi la situazione tra gli andamenti prima cottura (in blu) e dopo cottura (in rosso) sono abbastanza simili tra loro e, inoltre, DC i valori del gioco sono più bassi. Soffermandoci sul provino 3 vediamo come la cottura annulla tutti i giochi presenti tra le lamiere.

I valori del gioco tra le lamiere, per ogni punto, sono riportati nelle tabelle di figura 7.39.

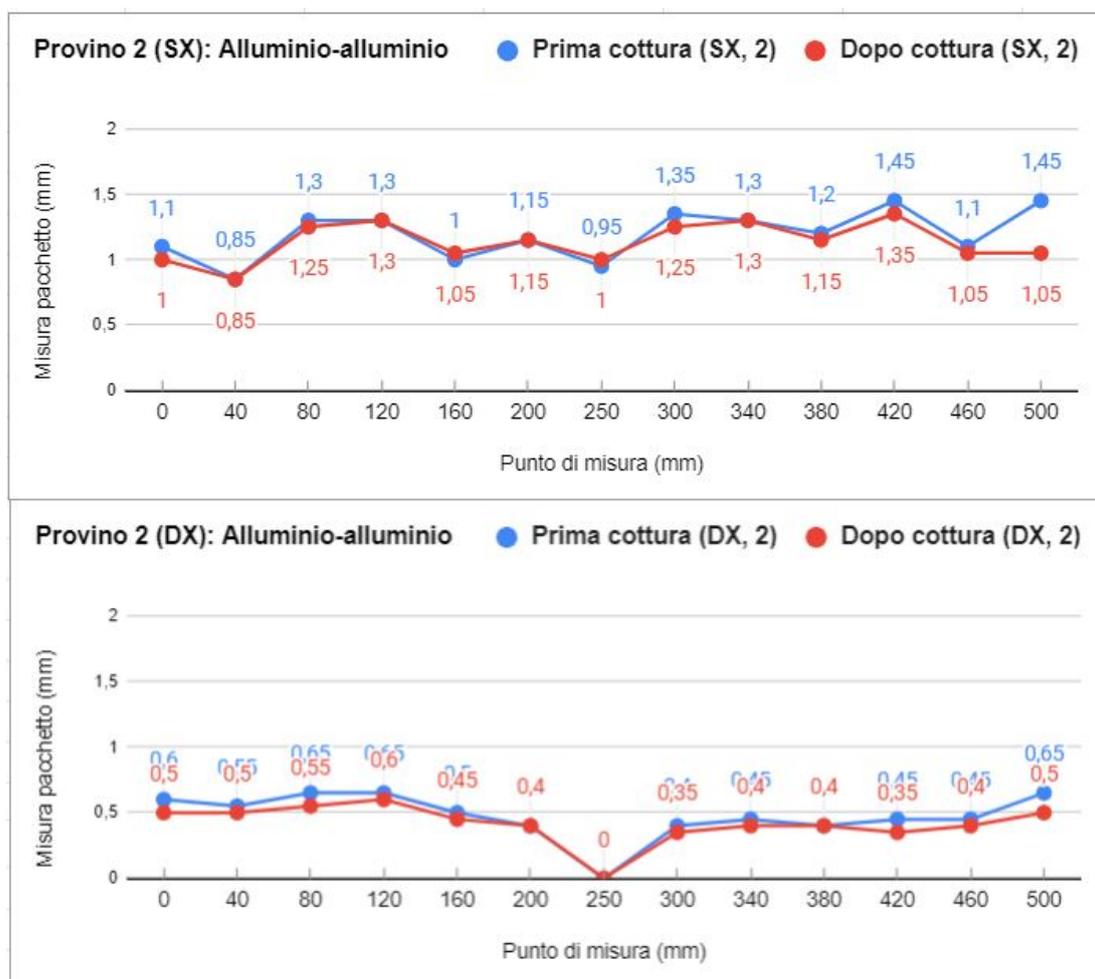


Figura 7.37: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il secondo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

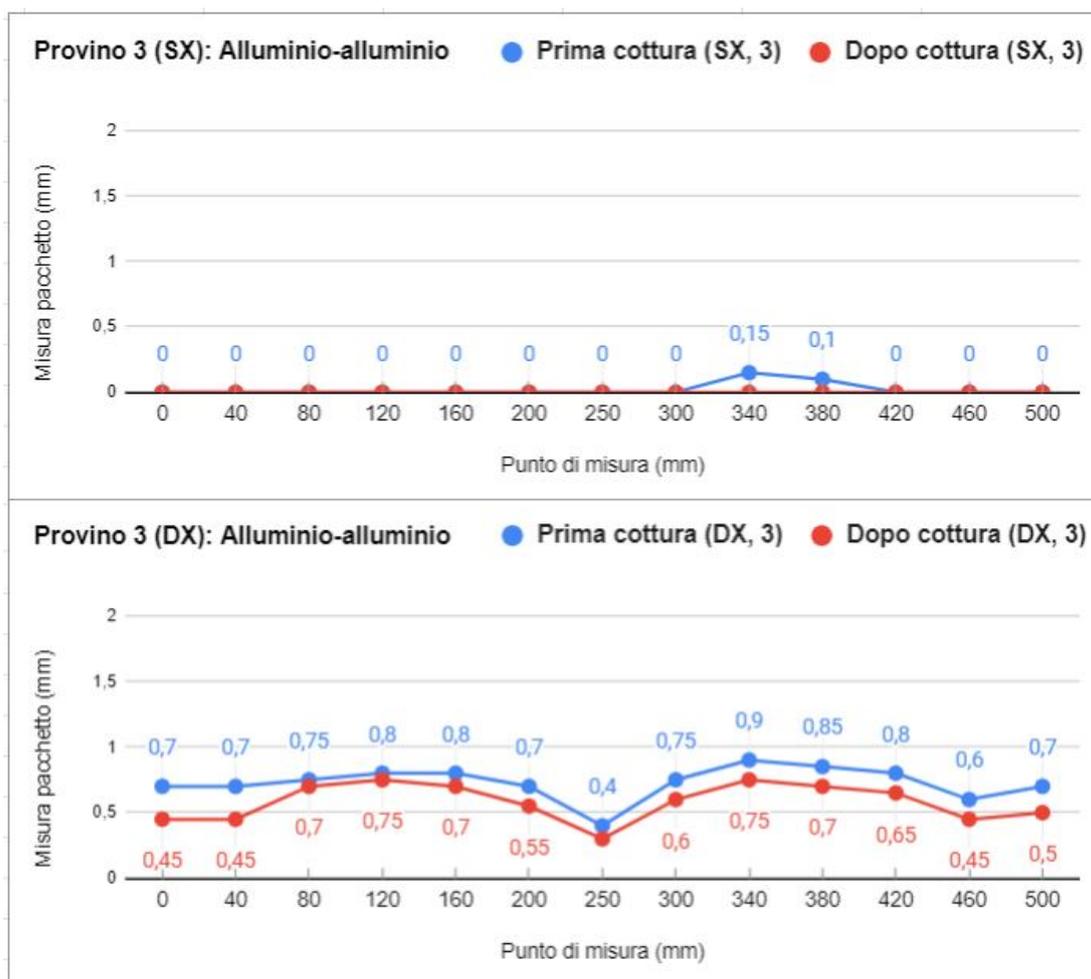


Figura 7.38: Valori medi della misura gioco acciaio-alluminio per il terzo provino. Grafico superiore lato sinistro; grafico inferiore lato destro.

P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Con spessimetro		
			Gioco alluminio-alluminio prima cottura	Gioco alluminio-alluminio dopo cottura	
1	1	0	SX	0,1	0
			DX	0,1	0,05
	2	40	SX	0,15	0,15
			DX	0	0
	3	80	SX	0,35	0,25
			DX	0,2	0,2
	4	120	SX	0,45	0,4
			DX	0,35	0,35
	5	160	SX	0,5	0,5
			DX	0,45	0,4
	6	200	SX	0,4	0,4
			DX	0,4	0,4
	7	250	SX	0,15	0
DX			0,3	0,3	
8	300	SX	0,35	0,05	
		DX	0,5	0,55	
9	340	SX	0,4	0,4	
		DX	0,65	0,7	
10	380	SX	0,45	0,4	
		DX	0,55	0,55	
11	420	SX	0,4	0,3	
		DX	0,25	0,25	
12	460	SX	0,2	0	
		DX	0	0	
13	500	SX	0,5	0,45	
		DX	0	0	

(a)

P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Con spessimetro		
			Gioco alluminio-alluminio prima cottura	Gioco alluminio-alluminio dopo cottura	
2	1	0	SX	1,1	1
			DX	0,6	0,5
	2	40	SX	0,85	0,85
			DX	0,55	0,5
	3	80	SX	1,3	1,25
			DX	0,65	0,55
	4	120	SX	1,3	1,3
			DX	0,65	0,6
	5	160	SX	1	1,05
			DX	0,5	0,45
	6	200	SX	1,15	1,15
			DX	0,4	0,4
	7	250	SX	0,95	1
DX			0	0	
8	300	SX	1,35	1,25	
		DX	0,4	0,35	
9	340	SX	1,3	1,3	
		DX	0,45	0,4	
10	380	SX	1,2	1,15	
		DX	0,4	0,4	
11	420	SX	1,45	1,35	
		DX	0,45	0,35	
12	460	SX	1,1	1,05	
		DX	0,45	0,4	
13	500	SX	1,45	1,05	
		DX	0,65	0,5	

(b)

P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Con spessimetro		
			Gioco alluminio-alluminio prima cottura	Gioco alluminio-alluminio dopo cottura	
3	1	0	SX	0	0
			DX	0,7	0,45
	2	40	SX	0	0
			DX	0,7	0,45
	3	80	SX	0	0
			DX	0,75	0,7
	4	120	SX	0	0
			DX	0,8	0,75
	5	160	SX	0	0
			DX	0,8	0,7
	6	200	SX	0	0
			DX	0,7	0,55
	7	250	SX	0	0
DX			0,4	0,3	
8	300	SX	0	0	
		DX	0,75	0,6	
9	340	SX	0,15	0	
		DX	0,9	0,75	
10	380	SX	0,1	0	
		DX	0,85	0,7	
11	420	SX	0	0	
		DX	0,8	0,65	
12	460	SX	0	0	
		DX	0,6	0,45	
13	500	SX	0	0	
		DX	0,7	0,5	

(c)

Figura 7.39: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

Capitolo 8

Prove di supporto: calorimetria differenziale a scansione

La calorimetria differenziale a scansione (**DSC**, Differential Scanning Calorimetry) è un'analisi che permette di caratterizzare molti tipi di materiali come polimeri, metalli e materiali ceramici [35]. La caratterizzazione dei materiali avviene grazie alla possibilità di misurare la temperatura e il flusso di calore associato alle transizioni che avvengono nel campione, le entalpie di fusione, le transizioni vetrose e le cinetiche di cristallizzazione di materiali polimerici.

In questa tesi è stata applicata la DSC come metodo di verifica dei risultati ottenuti dalle prove di dilatazione termica, in modo da associare ai valori numerici una spiegazione fisica-chimica del comportamento degli adesivi. I campioni analizzati sono costituiti dai soli adesivi non polimerizzati. La grandezza fisica di interesse che si vuole valutare è il tempo e la temperatura di reticolazione.

8.1 Principio di funzionamento e termogramma

Il principio di funzionamento del DSC prevede di fornire una quantità di calore al materiale, riscaldandolo o raffreddandolo, in un ambiente inerte. In particolare si misura la differenza di flusso termico tra il campione in esame e uno di riferimento mentre i due sono vincolati a una temperatura, variabile o isoterma, definita da un programma prestabilito [35].

Il risultato della prova è un grafico, che prende il nome di termogramma, in cui il flusso di calore (espresso in milliwatt) è riportato in funzione della temperatura del campione o del tempo trascorso. Osservando un termogramma completo (figura

8.1) si hanno dei picchi, positivi o negativi, che rappresentano le transizioni di fase che il campione subisce.

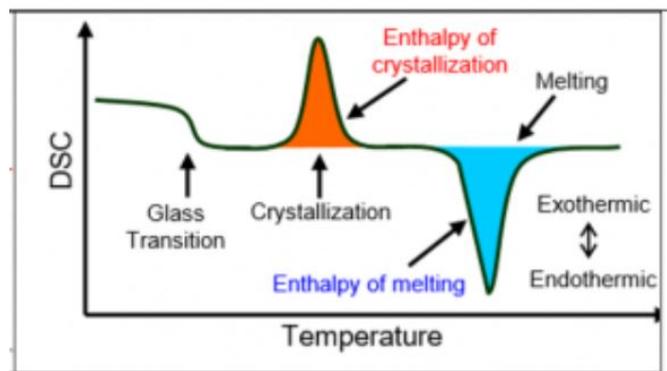


Figura 8.1: Esempio di un termogramma completo [36].

In un termogramma possiamo osservare le seguenti fasi:

- Transizione vetrosa: passaggio di fase che regola il cambiamento di un materiale polimerico amorfo da uno stato plastico a uno rigido e tipicamente fragile [37].
- Cristallizzazione: fenomeno per cui una sostanza assume lo stato cristallino, si solidifica.
- Fusione: i cristalli si rompono e il materiale ritorna allo stato fuso.

8.2 Svolgimento della prova

Per poter valutare la temperatura e il tempo di reticolazione degli adesivi sono state effettuate due prove con due metodi distinti: una prova con temperatura variabile (prova dinamica) e una prova isoterma.

Con entrambe le tipologie di prove è stata svolta la stessa procedura di preparazione del campione e della macchina. La macchina è provvista di due crogioli identici (detti coppettine) in cui andranno posizionati i due campioni, di riferimento e di test. Il crogiolo di riferimento è stato lasciato vuoto, per essere da riferimento nella misura differenziale, mentre nel secondo è stata depositata una massa precisa del campione. Dopo aver inserito i campioni nel crogiolo la macchina è stata chiusa ermeticamente e successivamente è stato creato un ambiente inerte (con azoto) nella camera del campione da analizzare. La prova inizia con il riscaldamento dei campioni, sia di prova che di riferimento, grazie l'azione della fornace del macchinario. Durante tutto l'arco dell'esperimento un sistema di termocoppie raccoglie i dati di temperatura e li invia ad un elaboratore che li elabora per generare l'uscita

per l'utente [35]. Ogni variazione di temperatura tra i due è dovuta a fenomeni che insorgono nel materiale da analizzare: una reazione esotermica innalzerà la temperatura del campione mentre una endotermica farà l'opposto [35].

8.2.1 Metodo di prova dinamico

I campioni degli adesivi sono stati sottoposti ad un riscaldamento dalla temperatura di 25°C a 300°C.

Il termogramma ottenuto è mostrato in figura 8.2. In rosso è rappresentato l'adesivo *Betamate 4600*, in nero l'adesivo *Betamate 1424* mentre in blu l'adesivo *Betamate 1822*.

La grandezza di interesse da estrapolare nel termogramma è l'inizio di reticolazione. Vediamo come il campione rosso e il nero iniziano la reticolazione alla stessa temperatura (rispettivamente 163,49°C e 163,56°C), mentre il campione blu circa dieci gradi dopo (172,28°C). Ciò vuol dire che l'adesivo *Betamate 1822* (in blu) inizia la reticolazione dopo, mentre l'adesivo *Betamate 4600* inizia a solidificare prima.

Gli andamenti diversi dei grafici che possiamo osservare sono implicabili ad una diversa formulazione chimica dei tre adesivi.

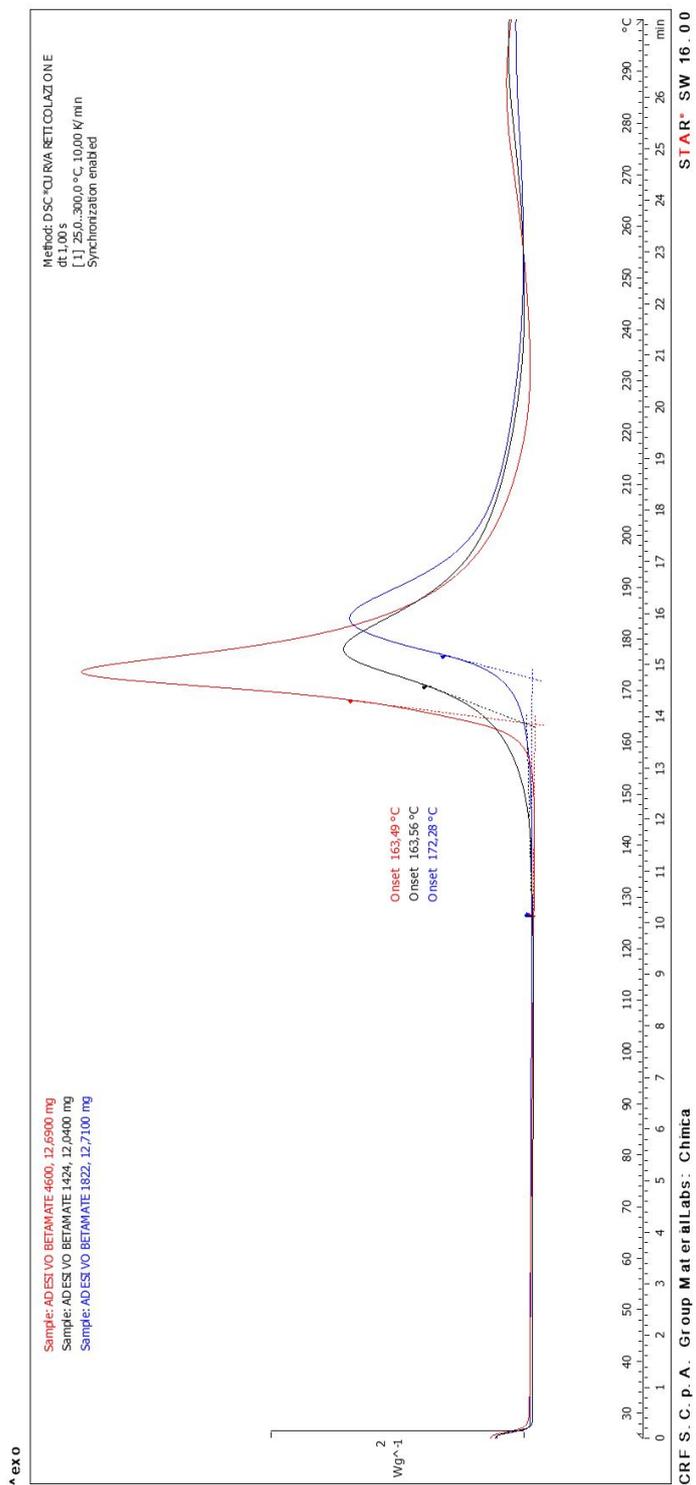


Figura 8.2: Termogramma della prova DSC dinamica: in rosso l'adesivo *Betamate 4600*, in nero l'adesivo *Betamate 1424* e in blu l'adesivo *Betamate 1822*

8.2.2 Metodo di prova isoterma

I campioni degli adesivi sono stati sottoposti ad un riscaldamento isoterma alla temperatura di 180°C per 30 minuti, ovvero le stesse condizioni adottate durante la prova di dilatazione termica.

Il termogramma che è stato ricavato dalla prova è mostrato in figura 8.3. Possiamo notare che in queste condizioni di temperatura tutti gli adesivi completano la reticolazione in 5 minuti (raggiungimento del tratto orizzontale).

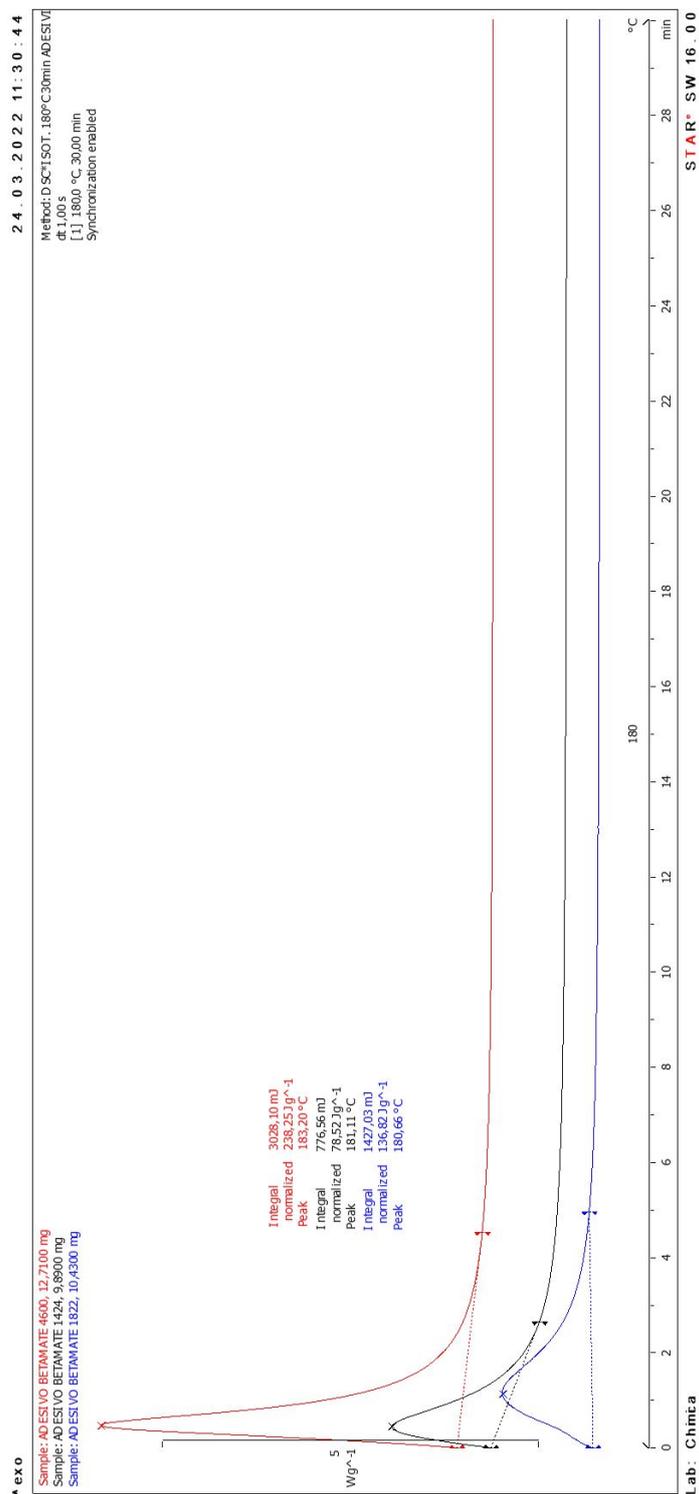


Figura 8.3: Termogramma della prova DSC isoterma: in rosso l'adesivo *Betamate 4600*, in nero l'adesivo *Betamate 1424* e in blu l'adesivo *Betamate 1822*.

Parte IV

Risultati e conclusioni

Capitolo 9

Risultati prove di resistenza al distacco per taglio

9.1 Risultati

Nei capitoli successivi saranno mostrati i risultati delle prove di trazione in funzione del tipo di adesivo applicato e delle condizioni di invecchiamento. Il confronto, tra i provini realizzati con i diversi adesivi, permette di valutare la scelta migliore dal punto di vista della resistenza al distacco per taglio dei giunti.

9.1.1 Confronto tra provini Betamate 1822

I grafici delle prove di trazione per i provini realizzati con l'adesivo specifico per i giunti ibridi (*Betamate 1822*) sono mostrati in figura 9.1.

Rispetto alla prova di trazione a temperatura ambiente (figura 9.1.a) possiamo osservare come specifiche condizioni, sia di invecchiamento che di vari valori di temperatura, influenzano il comportamento dell'adesivo in questione.

I valori massimi del carico raggiunti nelle varie prove sono riportati nella tabella 9.1, mentre i valori della tensione in tabella 9.2.

CARICO MASSIMO [kN]						
	<i>Provino 1</i>	<i>Provino 2</i>	<i>Provino 3</i>	<i>Provino 4</i>	<i>Provino 5</i>	Media
TA	5,75	6,45	5,74	5,85	6,58	6,07
-40°C	6,94	9,32	9,33	9,00	7,72	8,46
80°C	2,58	2,918	2,76	3,13	2,29	2,73
500h 100°C	7,56	5,68	7,01	6,82	6,87	6,79
500h CTUS	5,99	5,90	6,26	5,90	5,73	5,96
500h NS	5,12	5,38	4,75	5,27	4,59	5,02

Tabella 9.1: Valori del carico massimo ottenuti nelle prove di trazione con adesivo *Betamate 1822*.

TENSIONE MASSIMA [MPa]						
	<i>Provino 1</i>	<i>Provino 2</i>	<i>Provino 3</i>	<i>Provino 4</i>	<i>Provino 5</i>	Media
TA	19,15	21,50	19,15	19,49	21,93	20,24
-40°C	23,13	31,08	31,11	30,00	25,72	28,21
80°C	8,59	9,69	9,21	10,43	7,64	9,11
500h 100°C	25,21	18,92	23,35	22,74	22,89	22,62
500h CTUS	19,97	19,66	20,88	19,66	19,11	19,85
500h NS	17,08	17,95	15,83	17,57	15,31	16,75

Tabella 9.2: Valori della tensione massima ottenuti nelle prove di trazione con adesivo *Betamate 1822*.

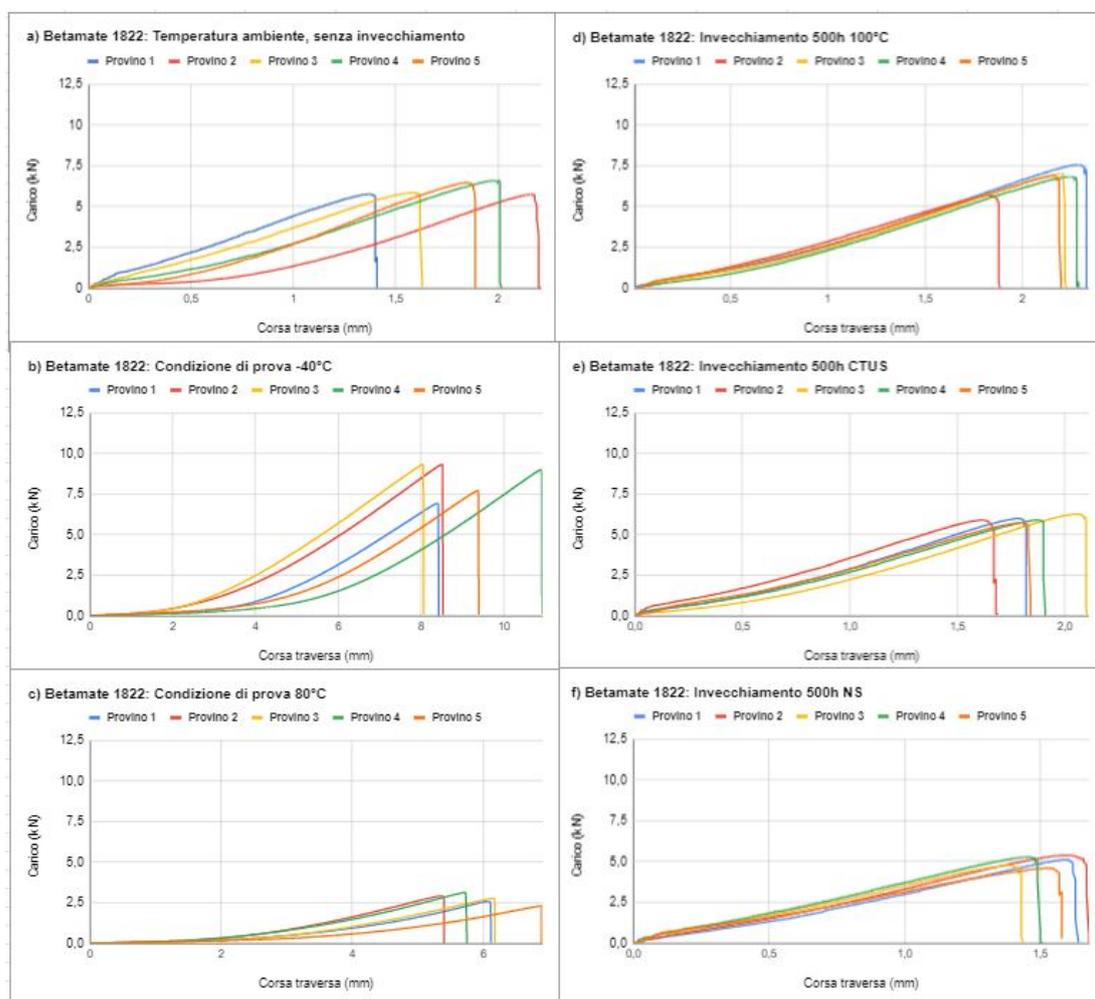


Figura 9.1: Grafici prove di trazione in varie condizioni: a) temperatura ambiente; b) temperatura -40°C ; c) temperatura 80°C ; d) invecchiamento 500 ore a 100°C ; e) invecchiamento 500 ore CTUS; f) invecchiamento 500 ore nebbia salina.

In particolare l'invecchiamento di 500 ore a 100°C è un trattamento migliorativo per le caratteristiche di resistenza a taglio dell'adesivo. I trattamenti di invecchiamento in camera umida e nebbia salina invece portano ad un peggioramento della resistenza dell'adesivo, rispettivamente in modo lieve e in modo più accentuato.

Per quanto riguarda invece le condizioni di temperatura durante la prova di trazione, l'adesivo presenta una buona risposta nelle condizioni a freddo (-40°C) mentre risultano peggiorativi i valori di temperatura ad 80°C .

9.1.2 Confronto tra provini Betamate 4600

I grafici delle prove di trazione per i provini realizzati con l'adesivo specifico per i giunti in alluminio (*Betamate 4600*) sono mostrati in figura 9.2.

I valori del carico massimo, raggiunto nelle varie prove, sono invece riportati nella tabella 9.3, mentre i valori della tensione massima sono riportati nella tabella 9.4.

CARICO MASSIMO [kN]						
	<i>Provino 1</i>	<i>Provino 2</i>	<i>Provino 3</i>	<i>Provino 4</i>	<i>Provino 5</i>	Media
TA	9,53	9,06	9,53	10,53	12,29	10,19
-40°C	11,17	12,12	6,28	11,44	12,20	10,64
80°C	7,04	6,69	8,35	7,29	4,44	6,76
500h 100°C	11,60	11,58	11,12	11,17	9,26	10,94
500h CTUS	11,02	10,35	11,69	9,83	11,29	10,84
500h NS	11,27	7,73	9,16	10,00	9,77	9,59

Tabella 9.3: Valori del carico massimo ottenuti nelle prove di trazione con adesivo *Betamate 4600*.

TENSIONE MASSIMA [MPa]						
	<i>Provino 1</i>	<i>Provino 2</i>	<i>Provino 3</i>	<i>Provino 4</i>	<i>Provino 5</i>	Media
TA	31,76	30,19	31,78	35,10	35,10	33,96
-40°C	37,24	40,39	20,92	38,14	40,66	35,47
80°C	23,46	22,30	27,84	24,29	14,79	22,53
500h 100°C	38,65	38,61	37,06	37,24	30,85	36,48
500h CTUS	36,74	34,50	38,95	32,77	37,65	36,12
500h NS	37,58	25,77	30,52	33,33	32,58	31,96

Tabella 9.4: Valori della tensione massima ottenuti nelle prove di trazione con adesivo *Betamate 4600*.

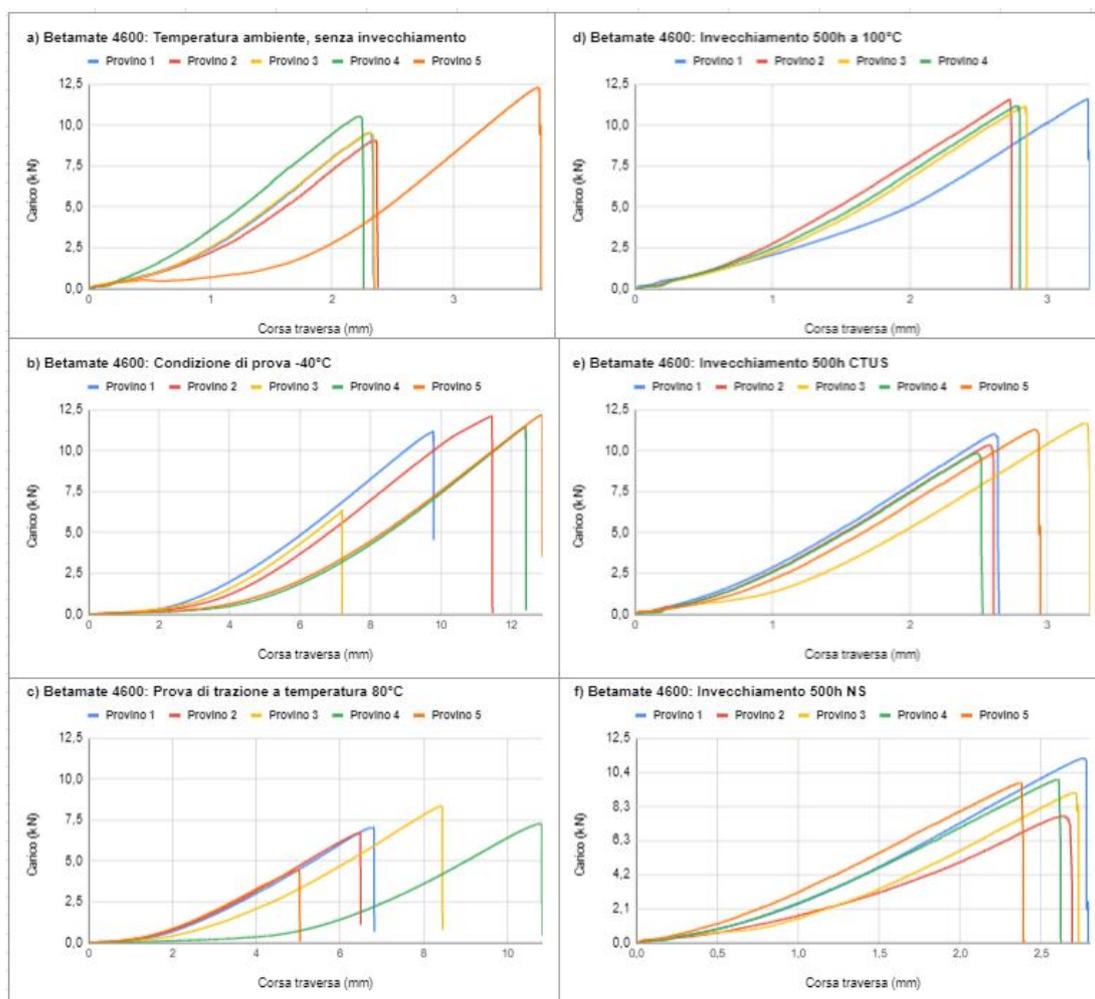


Figura 9.2: Grafici prove di trazione in varie condizioni: a) temperatura ambiente; b) temperatura -40°C; c) temperatura 80°C; d) invecchiamento 500 ore a 100°C; e) invecchiamento 500 ore CTUS; f) invecchiamento 500 ore nebbia salina.

9.1.3 Confronto tra provini Betamate 1424

I grafici delle prove di trazione per i provini realizzati con l'adesivo specifico per i giunti in acciaio (*Betamate 1424*) sono mostrati in figura 9.3.

I valori del carico massimo raggiunto nelle varie prove sono riportati nella tabella 9.5, mentre i valori della tensione massima sono riportati nella tabella 9.6.

CARICO MASSIMO [kN]						
	<i>Provino 1</i>	<i>Provino 2</i>	<i>Provino 3</i>	<i>Provino 4</i>	<i>Provino 5</i>	Media
TA	9,53	7,92	8,96	8,66	8,75	8,76
-40°C	10,41	9,80	9,65	10,59	11,90	10,47
80°C	5,12	3,48	3,22	4,45	2,92	3,84
500h 100°C	7,81	9,01	9,19	8,78	6,30	8,22
500h CTUS	8,56	8,31	7,66	6,24	5,35	7,22
500h NS	6,31	5,41	5,58	7,12	6,00	6,08

Tabella 9.5: Valori del carico massimo ottenuti nelle prove di trazione con adesivo *Betamate 1424*.

TENSIONE MASSIMA [MPa]						
	<i>Provino 1</i>	<i>Provino 2</i>	<i>Provino 3</i>	<i>Provino 4</i>	<i>Provino 5</i>	Media
TA	31,96	26,38	29,88	28,85	29,16	29,25
-40°C	34,70	32,66	32,18	35,31	39,62	34,89
80°C	17,06	11,61	10,74	14,84	9,72	12,80
500h 100°C	26,03	30,03	30,62	29,27	21,01	27,39
500h CTUS	28,52	27,70	25,53	20,82	17,83	24,08
500h NS	21,02	18,03	18,60	23,73	19,99	20,27

Tabella 9.6: Valori della tensione massima ottenuti nelle prove di trazione con adesivo *Betamate 1424*.

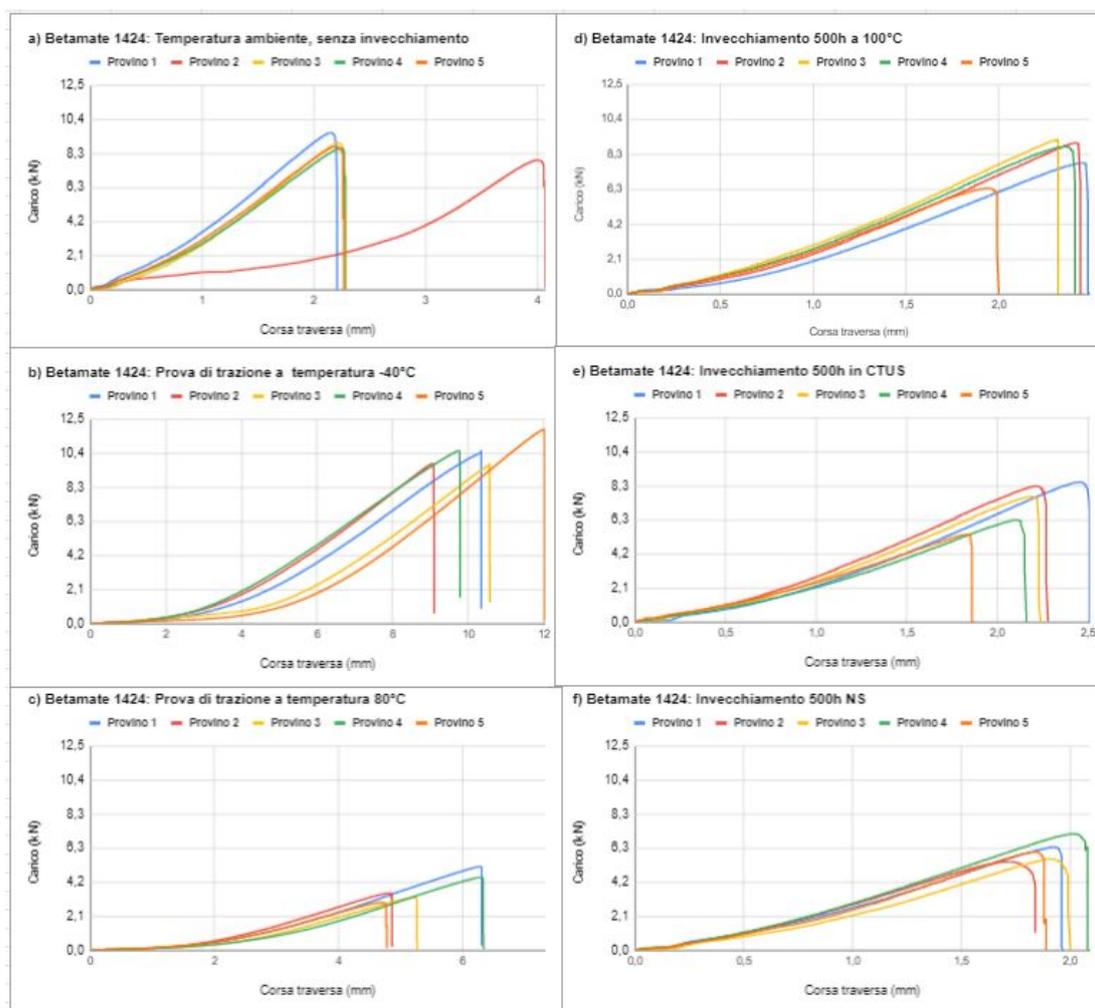


Figura 9.3: Grafici prove di trazione in varie condizioni: a) temperatura ambiente; b) temperatura -40°C; c) temperatura 80°C; d) invecchiamento 500 ore a 100°C; e) invecchiamento 500 ore CTUS; f) invecchiamento 500 ore nebbia salina.

9.1.4 Confronto tra adesivi

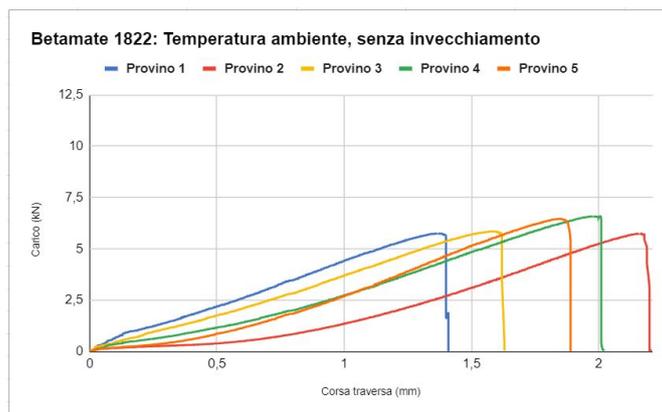
Nell'identificazione delle linee guida per la progettazione dei giunti ibridi risulta fondamentale un confronto della resistenza al distacco per taglio tra le tipologie di adesivi adottati.

Le immagini seguenti riassumono i risultati ottenuti con i diversi adesivi nelle varie prove, in modo da poter essere di migliore confronto. In figura 9.4 abbiamo gli andamenti delle prove a temperatura ambiente, in figura 9.5 gli invecchiamenti di 500 ore a 100°C, in figura 9.6 gli invecchiamenti di 500 ore in CTUS, in figura 9.7 gli invecchiamenti di 500 ore in NS, in figura 9.8 le prove di trazione a -40°C e, per concludere, in figura 9.9 le prove di trazione ad 80°C.

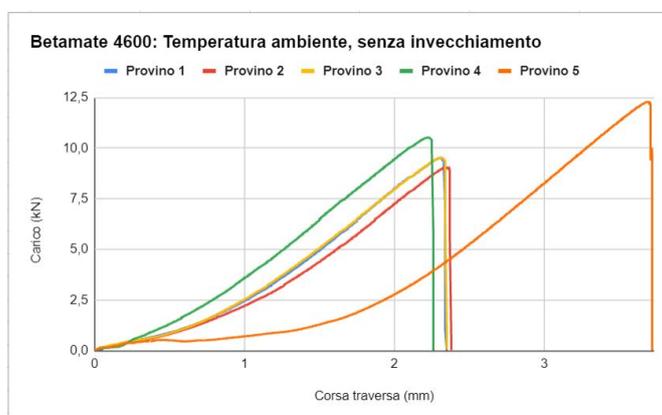
Possiamo notare subito come con l'adesivo per i giunti ibridi (*Betamate 1822*) si raggiungano valori del carico a rottura, e quindi della tensione, sensibilmente più bassi.

Di conseguenza se si dovesse scegliere un tipo di adesivo, considerando solo questi valori di carico, la scelta ricadrebbe sul *Betamate 4600* (adesivo per giunti in alluminio) per il quale si ottengono i maggiori valori in ogni condizione.

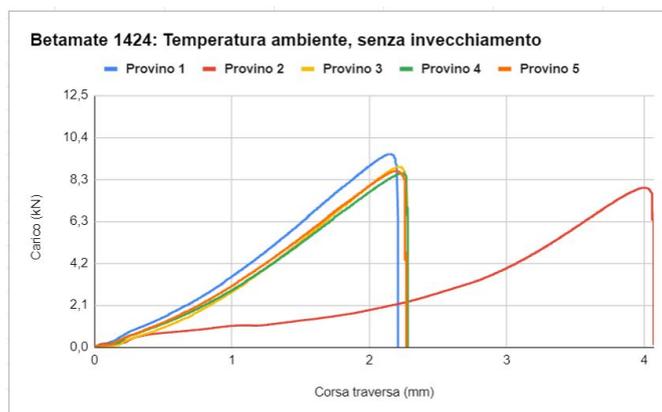
Durante la fase di progettazione bisogna anche considerare il campo di applicazione e le condizioni di funzionamento dell'adesivo, non solo i carichi massimi raggiunti. L'adesivo *Betamate 1822* è più elastico delle altre tipologie (si rimanda ai moduli di elastici nella tabella 5.22 del capitolo 5.5). Quindi può essere la migliore soluzione nelle situazioni e zone in cui è richiesta maggiore elasticità.



(a)

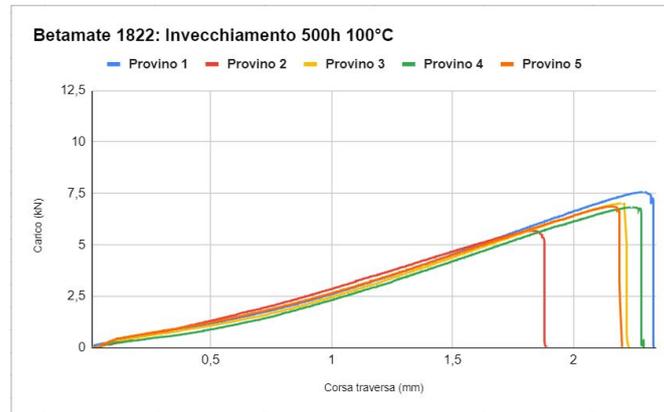


(b)

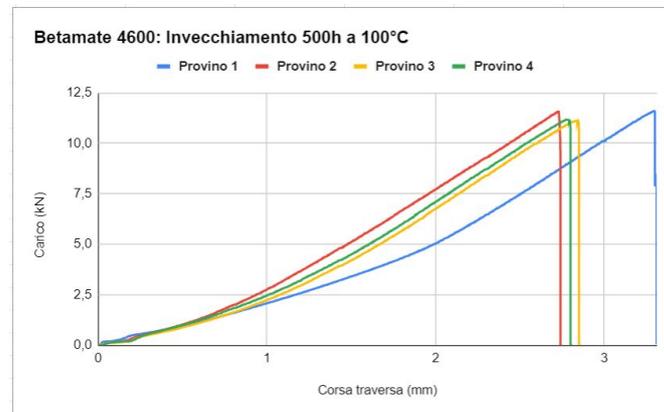


(c)

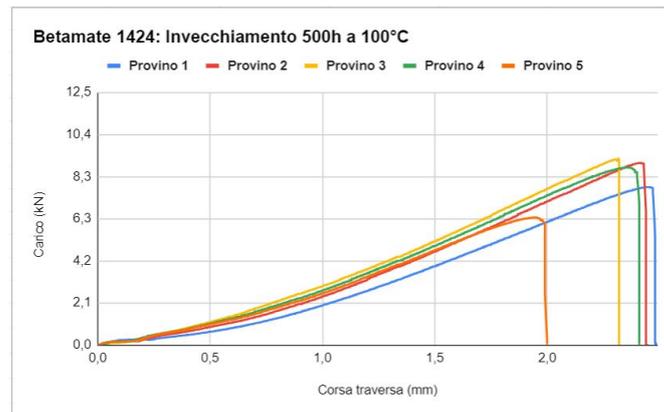
Figura 9.4: Andamenti prove di trazione a temperatura ambiente al variare dl tipo di adesivo: a) *Betamate 1822*; b) *Betamate 4600*; c) *Betamate 1424*.



(a)

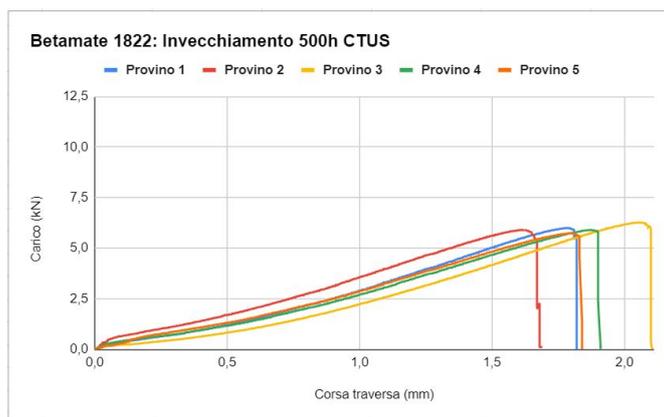


(b)

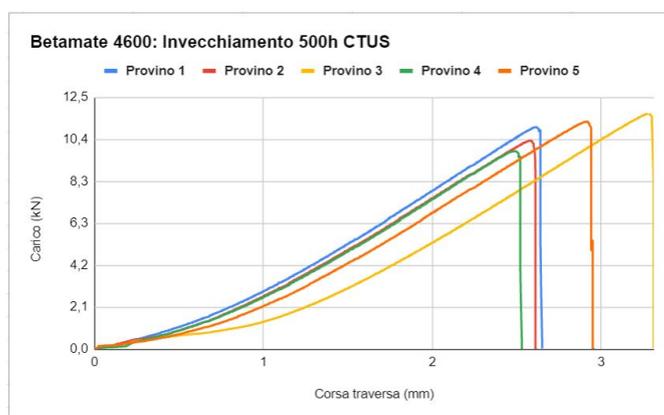


(c)

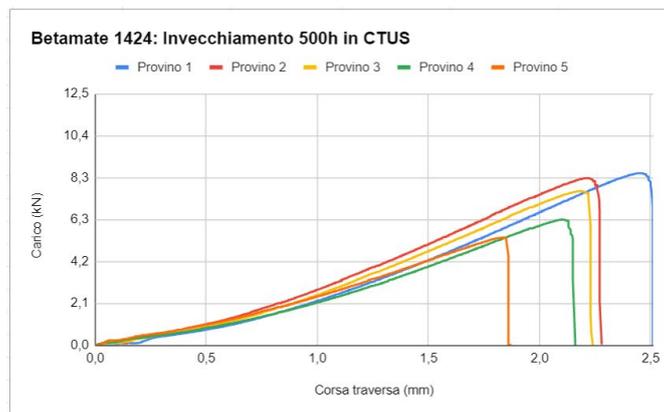
Figura 9.5: Andamenti prove di trazione dopo invecchiamento 500 ore a 100°C variare dl tipo di adesivo: a) *Betamate 1822*; b) *Betamate 4600*; c) *Betamate 1424*.



(a)

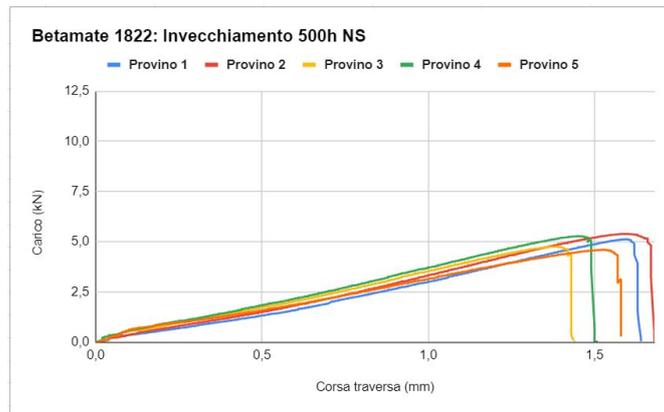


(b)

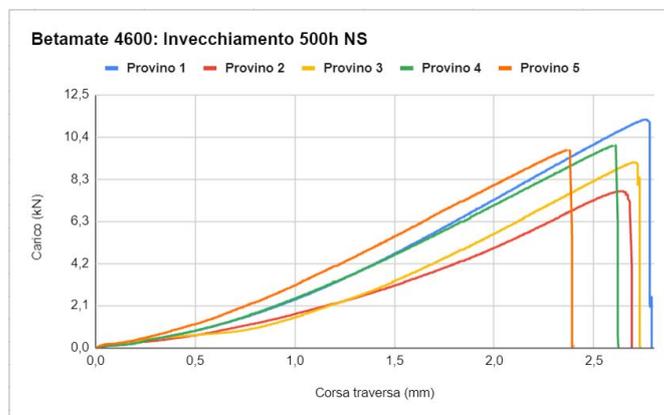


(c)

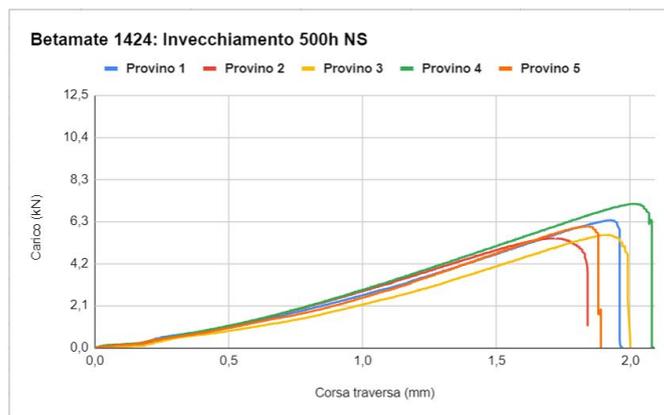
Figura 9.6: Andamenti prove di trazione dopo invecchiamento 500 ore in CTUS variare dl tipo di adesivo: a) *Betamate 1822*; b) *Betamate 4600*; c) *Betamate 1424*.



(a)

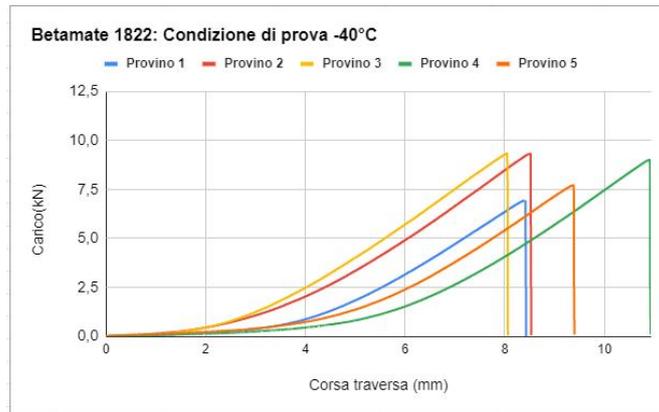


(b)

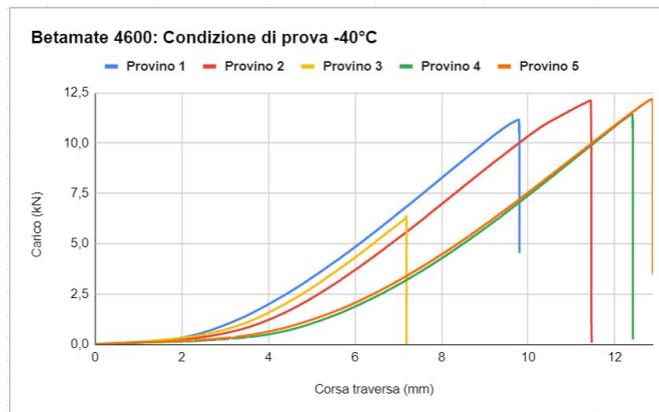


(c)

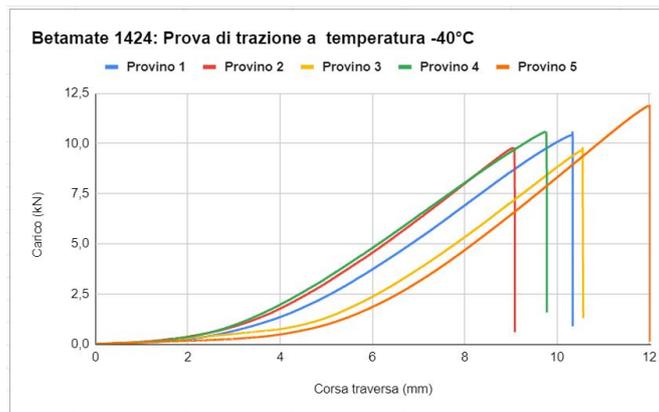
Figura 9.7: Andamenti prove di trazione dopo invecchiamento 500 ora in NS, al variare dl tipo di adesivo: a) *Betamate 1822*; b) *Betamate 4600*; c) *Betamate 1424*.



(a)

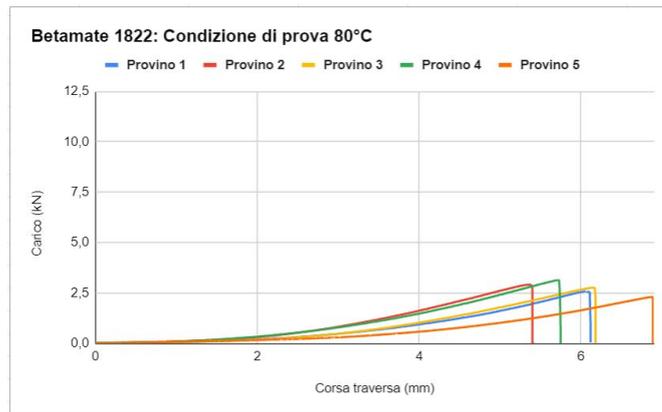


(b)

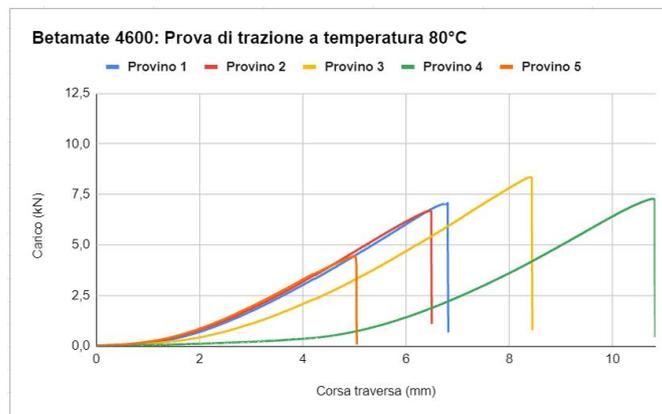


(c)

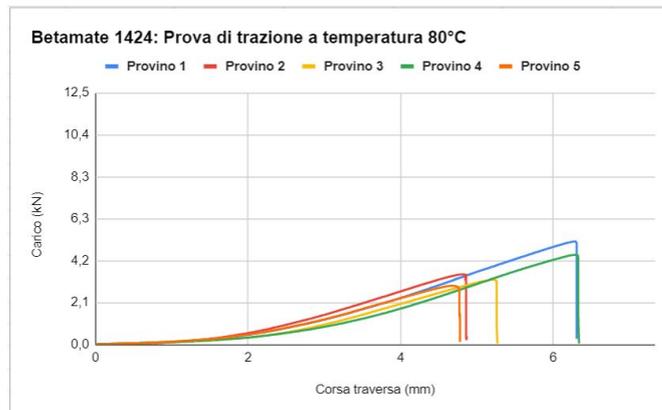
Figura 9.8: Andamenti prove di trazione a temperatura -40°C al variare dl tipo di adesivo: a) *Betamate 1822*; b) *Betamate 4600*; c) *Betamate 1424*.



(a)



(b)



(c)

Figura 9.9: Andamenti prove di trazione a temperatura di 80°C, al variare dl tipo di adesivo: a) *Betamate 1822*; b) *Betamate 4600*; c) *Betamate 1424*.

9.2 Sviluppo futuri

La valutazione della resistenza al distacco per taglio degli adesivi in giunti ibridi acciaio-alluminio potrebbe essere migliorata analizzando ulteriori variabili in studi futuri:

- Spessore dell'adesivo: una prima variabile da analizzare potrebbe essere la valutazione della resistenza al distacco per taglio dell'adesivo con diverso spessore di adesivo;
- Pulizia delle superfici: in questo studio, così come effettivamente accade nel processo di produzione dei un veicolo, le lamiere non hanno subito alcun processo di pulizia delle superfici. Potrebbe essere interessante valutare come un processo di sgrassatura o di oliatura influenza la resistenza al taglio dell'adesivo;
- Sovracottura: oltre ai processi di invecchiamento studiati un ulteriore completamento dello studio potrebbe essere la realizzazione di provini destinati ad un processo di sovracottura prima di effettuare la prova di trazione.

Capitolo 10

Risultati prove di dilatazione termica differenziata

10.1 Risultati

Nei capitoli successivi saranno mostrate le misurazioni ottenute (spessore del pacchetto lamiera e del gioco tra le lamiere) in funzione del tipo di adesivo applicato. Il confronto, tra i provini realizzati con i diversi adesivi, permette di valutare la migliore scelta nell'obiettivo di contenimento delle dilatazioni differenziate tra le lamiere di acciaio e alluminio.

10.1.1 Confronto misura pacchetto lamiera

Di seguito sono riportati i valori dello spessore pacchetto ottenuti con i tre adesivi, per ogni provino. Le misurazioni effettuate nei provini realizzati con *Betamate 1822*, sia prima della cottura che dopo, sono mostrate in figura 10.1 e in figura 10.2 rispettivamente per il lato destro e sinistro. Le misurazioni effettuate nei provini realizzati con *Betamate 4600*, sia prima della cottura che dopo, sono mostrate in figura 10.3 e in figura 10.4 rispettivamente per il lato destro e sinistro. Infine, per i provini realizzati con *Betamate 1424* si rimanda alla figura 10.5 e alla figura 10.6 rispettivamente per il lato destro e sinistro.

Per entrambi i lati, destro e sinistro, possiamo osservare degli andamenti prima e dopo cottura abbastanza simili tra loro. In particolare i valori dopo la cottura sono sempre minori al caso prima cottura (PC), ad eccezione di qualche punto sporadico.

Se ci soffermiamo su i singoli valori delle misurazioni, possiamo notare che le differenze maggiori si notano nel terzo provino realizzato con l'adesivo specifico per l'alluminio (*Betamate 4600*) ed il secondo provino realizzato con l'adesivo specifico per l'acciaio (*Betamate 1424*). Possibilmente queste misure molto diverse, rispetto i restanti provini, sono da attribuire a delle tolleranze geometriche e di forma non idonee. Questo ci permette di dedurre come sia molto importante avere un accoppiamento perfetto tra le lamiere, affinché si abbia un'uniformità dello spessore lamiera e la buona riuscita della giunzione.

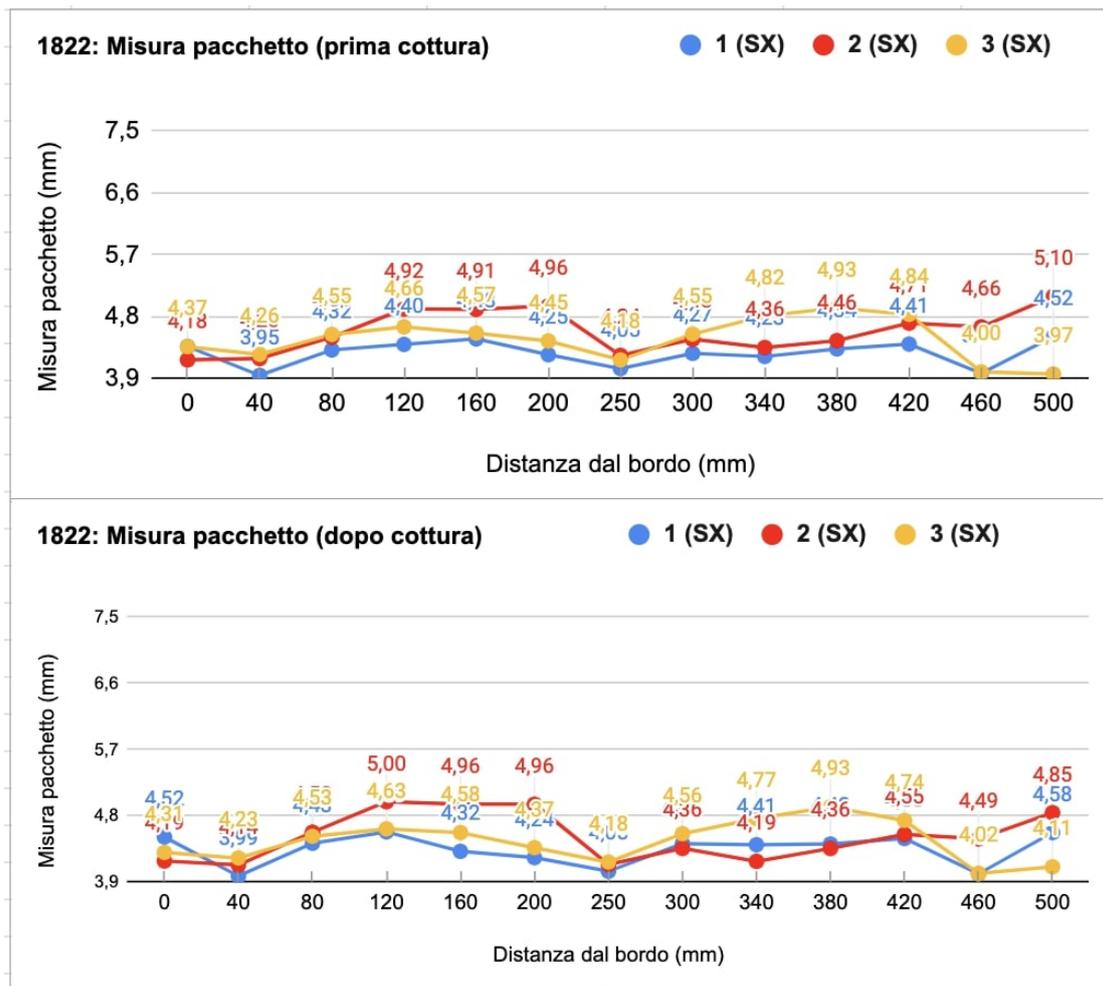


Figura 10.1: Valori della misura pacchetto lato sinistro con *Betamate 1822*: superiore prima cottura; inferiore dopo cottura.

Nelle tabelle di figura 10.7 sono riportati i valori dello spessore del pacchetto, sia prima cottura che dopo la cottura dei provini realizzati con adesivo *Betamate 1822*, mentre in figura 10.8 quelli con adesivo *Betamate 4600* ed infine in figura

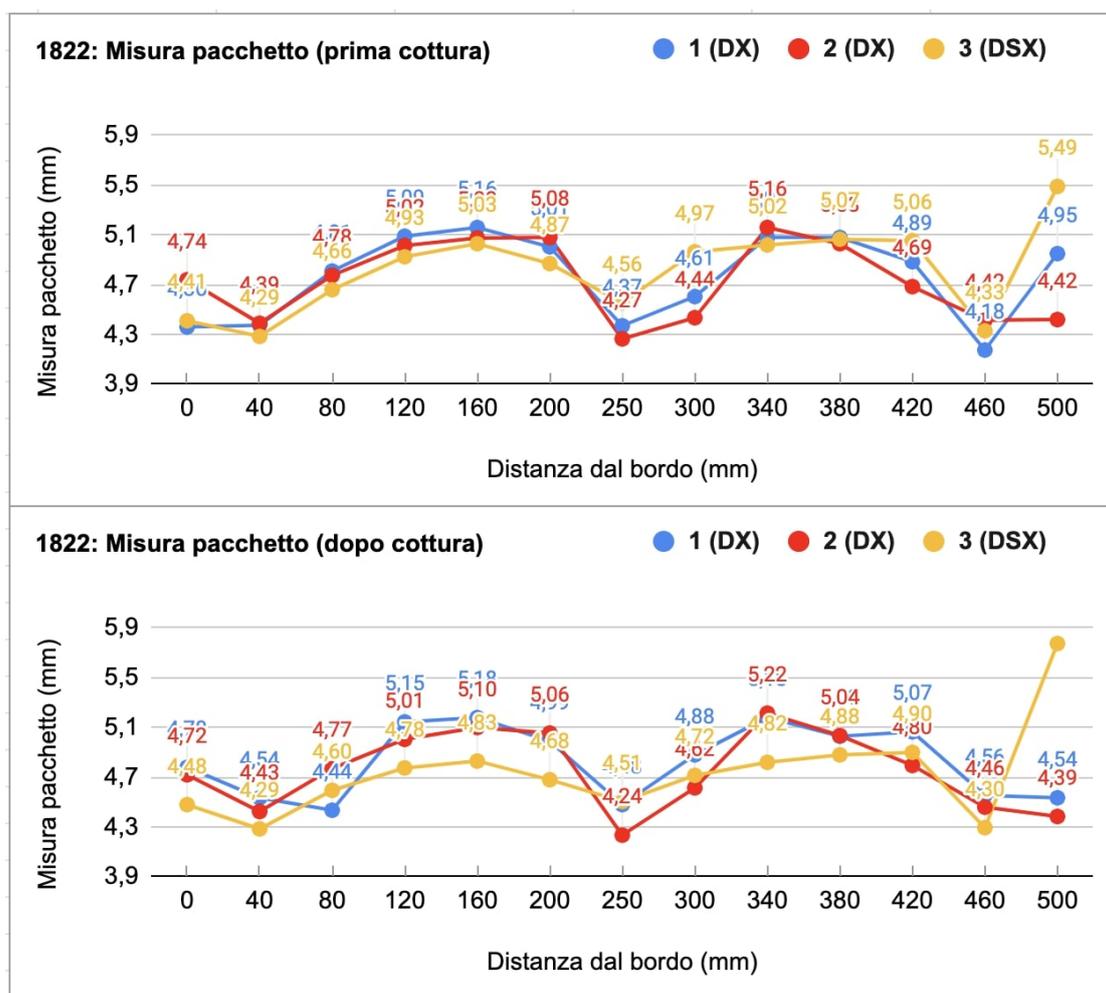


Figura 10.2: Valori della misura pacchetto lato destro con *Betamate 1822*: superiore prima cottura; inferiore dopo cottura.

10.9 con adesivo *Betamate 1424*. In verde sono evidenziati i valori dopo cottura migliorativi, ovvero inferiori alla situazione prima cottura (PC), mentre in rosso sono evidenziati i valori superiori alla situazione PC. Osservando i valori riportati in tali tabelle, che evidenziano come cambia lo spessore del pacchetto tra prima e dopo cottura dei provini, possiamo dire che l'adesivo che permette di ottenere uno spessore del pacchetto ridotto dopo la cottura è l'adesivo *Betamate 1424*.

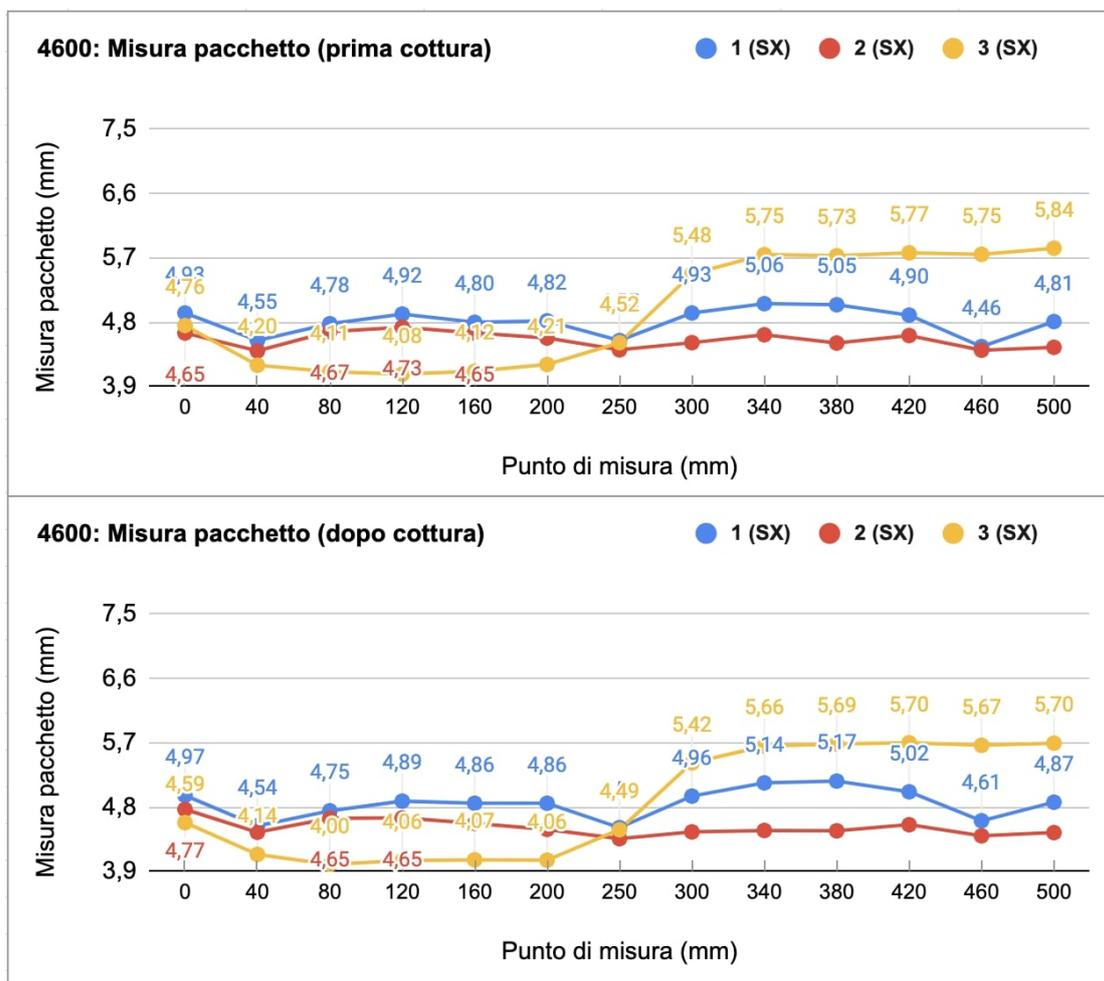


Figura 10.3: Valori della misura pacchetto lato sinistro con *Betamate 4600*: superiore prima cottura; inferiore dopo cottura.

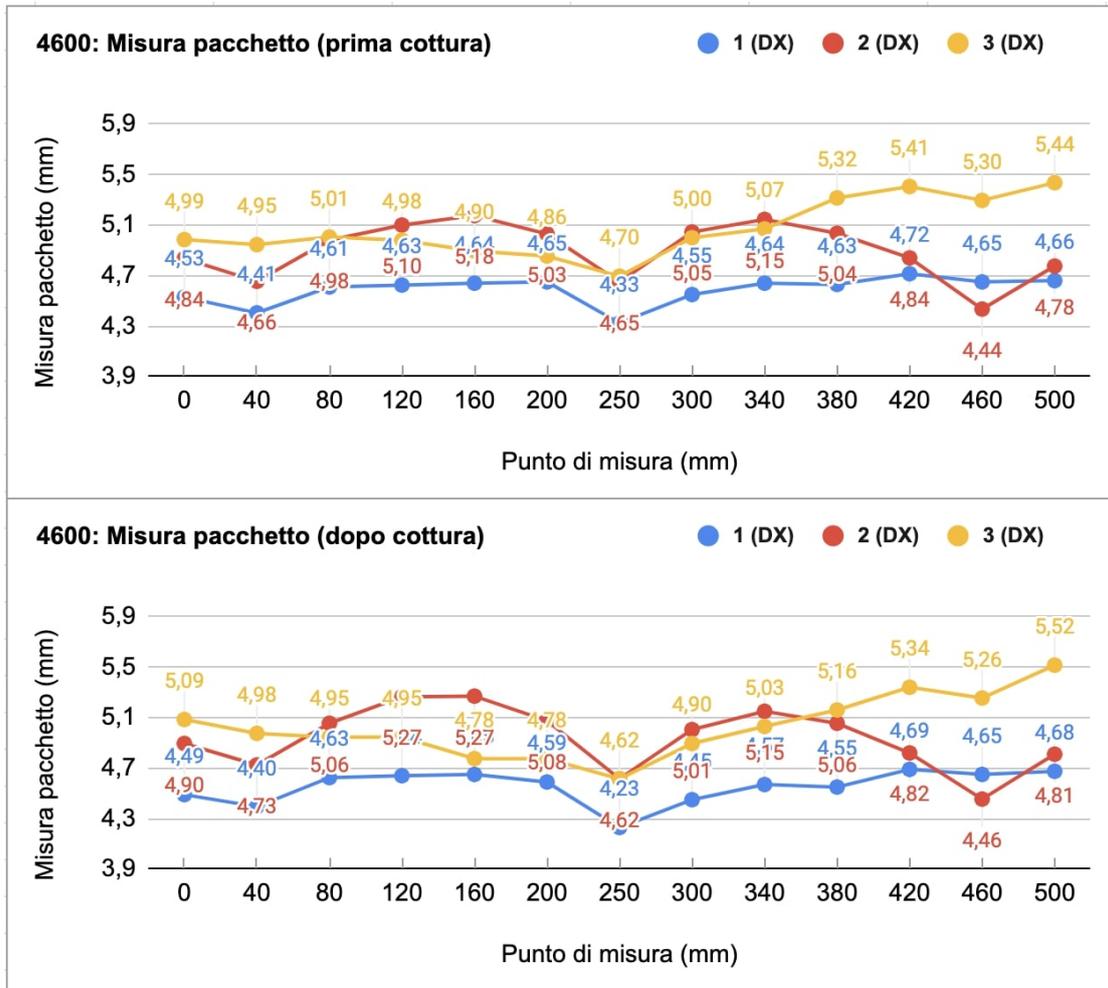


Figura 10.4: Valori della misura pacchetto lato destro con *Betamate 4600*: superiore prima cottura; inferiore dopo cottura.

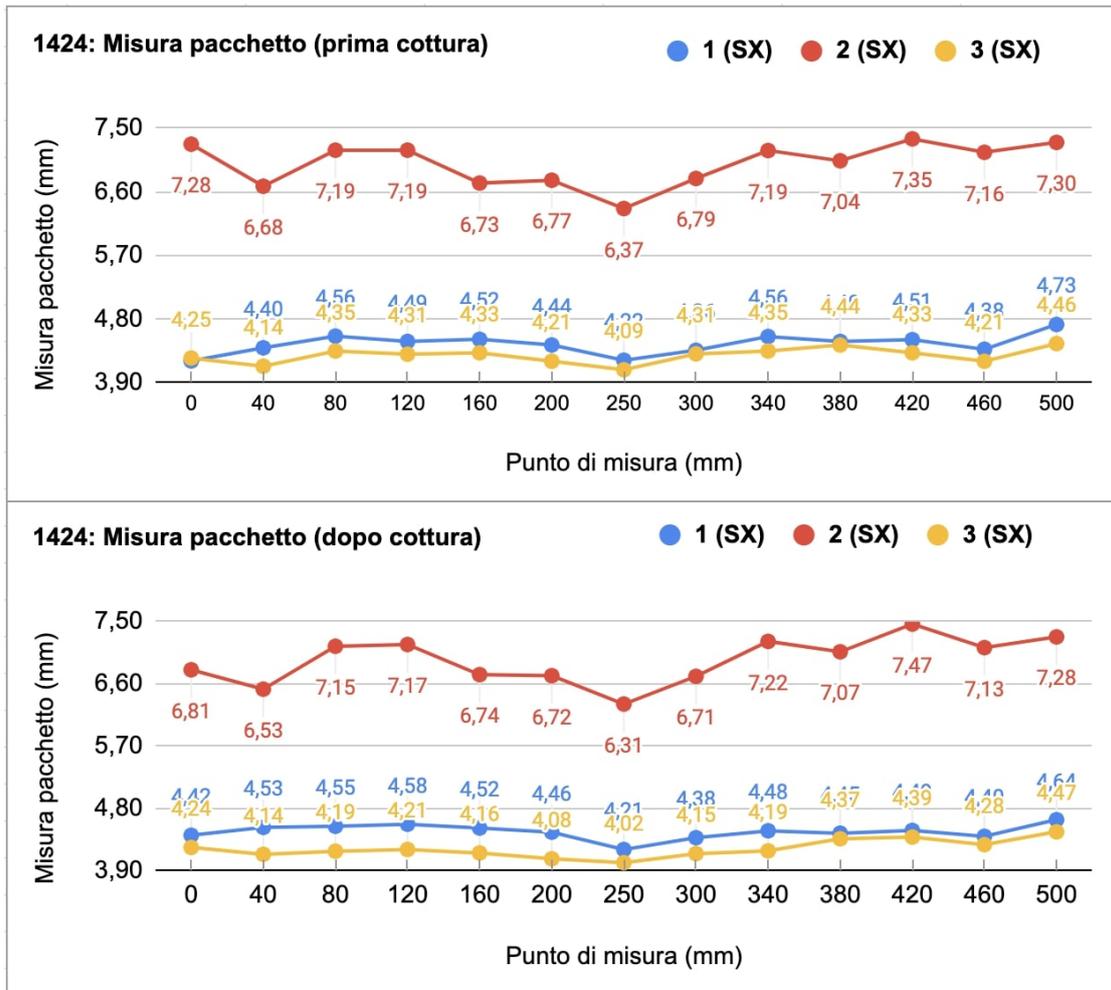


Figura 10.5: Valori della misura pacchetto lato sinistro con *Betamate 1424*: superiore prima cottura; inferiore dopo cottura.

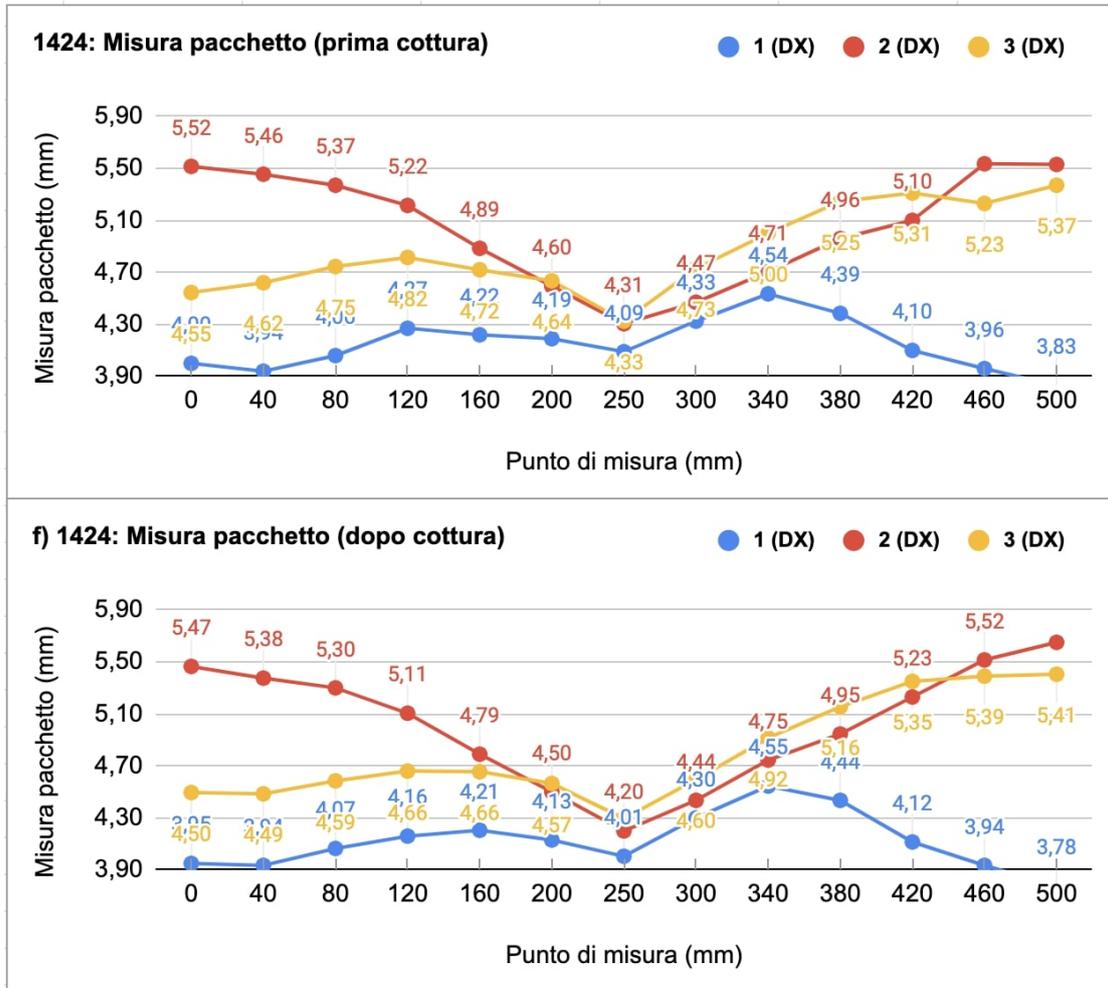


Figura 10.6: Valori della misura pacchetto lato destro con *Betamate 1424*: superiore prima cottura; inferiore dopo cottura.

Risultati prove di dilatazione termica differenziata

		Con calibro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)		Misura prima cottura	Misura dopo cottura
1	1	0	SX	4,37	4,52
			DX	4,36	4,78
	2	40	SX	3,95	3,99
			DX	4,38	4,54
	3	80	SX	4,32	4,43
			DX	4,81	4,44
	4	120	SX	4,40	4,59
			DX	5,09	5,15
	5	160	SX	4,48	4,32
			DX	5,16	5,18
	6	200	SX	4,25	4,24
			DX	5,01	4,99
	7	250	SX	4,05	4,05
DX			4,37	4,48	
8	300	SX	4,27	4,43	
		DX	4,61	4,88	
9	340	SX	4,23	4,41	
		DX	5,08	5,18	
10	380	SX	4,34	4,42	
		DX	5,08	5,03	
11	420	SX	4,41	4,5	
		DX	4,89	5,07	
12	460	SX	3,98	4,02	
		DX	4,18	4,56	
13	500	SX	4,52	4,58	
		DX	4,96	4,54	

(a)

(b)

(c)

Figura 10.7: Tabelle riassuntive dei valori misurati dello spessore pacchetto lamiera con adesivo *Betamate 1822*: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

10.1 – Risultati

		Con calibro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Misura		
			prima cottura	dopo cottura	
1	1	0	SX	4,93	4,97
			DX	4,53	4,49
	2	40	SX	4,55	4,57
			DX	4,41	4,40
	3	80	SX	4,78	4,75
			DX	4,61	4,63
	4	120	SX	4,92	4,89
			DX	4,63	4,64
	5	160	SX	4,80	4,86
			DX	4,64	4,65
	6	200	SX	4,82	4,86
			DX	4,65	4,59
	7	250	SX	4,55	4,52
DX			4,33	4,23	
8	300	SX	4,93	4,96	
		DX	4,55	4,45	
9	340	SX	5,06	5,14	
		DX	4,64	4,57	
10	380	SX	5,05	5,17	
		DX	4,63	4,55	
11	420	SX	4,9	5,02	
		DX	4,72	4,69	
12	460	SX	4,46	4,61	
		DX	4,65	4,65	
13	500	SX	4,81	4,87	
		DX	4,66	4,68	

		Con calibro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Misura		
			prima cottura	dopo cottura	
2	1	0	SX	4,65	4,77
			DX	4,84	4,90
	2	40	SX	4,40	4,45
			DX	4,66	4,73
	3	80	SX	4,67	4,65
			DX	4,98	5,06
	4	120	SX	4,73	4,65
			DX	5,10	5,27
	5	160	SX	4,65	4,58
			DX	5,18	5,27
	6	200	SX	4,58	4,49
			DX	5,03	5,08
	7	250	SX	4,42	4,36
DX			4,65	4,62	
8	300	SX	4,52	4,46	
		DX	5,05	5,01	
9	340	SX	4,63	4,48	
		DX	5,15	5,15	
10	380	SX	4,51	4,47	
		DX	5,04	5,06	
11	420	SX	4,62	4,56	
		DX	4,84	4,82	
12	460	SX	4,41	4,40	
		DX	4,44	4,46	
13	500	SX	4,45	4,45	
		DX	4,78	4,81	

(a)

(b)

		Con calibro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Misura		
			prima cottura	dopo cottura	
3	1	0	SX	4,76	4,59
			DX	4,99	5,09
	2	40	SX	4,21	4,14
			DX	4,95	4,98
	3	80	SX	4,11	4,00
			DX	5,01	4,95
	4	120	SX	4,08	4,06
			DX	4,98	4,95
	5	160	SX	4,12	4,07
			DX	4,90	4,78
	6	200	SX	4,21	4,06
			DX	4,86	4,78
	7	250	SX	4,52	4,49
DX			4,70	4,62	
8	300	SX	5,48	5,42	
		DX	5	4,9	
9	340	SX	5,75	5,66	
		DX	5,07	5,03	
10	380	SX	5,73	5,69	
		DX	5,32	5,16	
11	420	SX	5,77	5,7	
		DX	5,41	5,34	
12	460	SX	5,75	5,67	
		DX	5,30	5,26	
13	500	SX	5,84	5,70	
		DX	5,44	5,52	

(c)

Figura 10.8: Tabelle riassuntive dei valori misurati dello spessore pacchetto lamiera con adesivo *Betamate 4600*: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

Risultati prove di dilatazione termica differenziata

		Con calibro			
P R O V I N O	1	N°	Punto (mm)		
				Misura prima cottura	Misura dopo cottura
1	0	SX	4,21	4,42	
		DX	4,00	3,95	
2	40	SX	4,40	4,53	
		DX	3,94	3,94	
3	80	SX	4,56	4,55	
		DX	4,06	4,07	
4	120	SX	4,49	4,58	
		DX	4,27	4,16	
5	160	SX	4,52	4,52	
		DX	4,22	4,21	
6	200	SX	4,44	4,46	
		DX	4,19	4,13	
7	250	SX	4,22	4,21	
		DX	4,09	4,01	
8	300	SX	4,36	4,38	
		DX	4,33	4,3	
9	340	SX	4,56	4,48	
		DX	4,54	4,55	
10	380	SX	4,49	4,45	
		DX	4,39	4,44	
11	420	SX	4,51	4,49	
		DX	4,10	4,12	
12	460	SX	4,38	4,40	
		DX	3,96	3,94	
13	500	SX	4,73	4,64	
		DX	3,83	3,78	

(a)

		Con calibro			
P R O V I N O	2	N°	Punto (mm)		
				Misura prima cottura	Misura dopo cottura
1	0	SX	7,28	6,81	
		DX	5,52	5,47	
2	40	SX	6,68	6,53	
		DX	5,46	5,38	
3	80	SX	7,19	7,15	
		DX	5,37	5,30	
4	120	SX	7,19	7,17	
		DX	5,22	5,11	
5	160	SX	6,73	6,74	
		DX	4,89	4,79	
6	200	SX	6,77	6,72	
		DX	4,60	4,50	
7	250	SX	6,37	6,31	
		DX	4,31	4,20	
8	300	SX	6,79	6,71	
		DX	4,47	4,44	
9	340	SX	7,19	7,22	
		DX	4,71	4,75	
10	380	SX	7,04	7,07	
		DX	4,96	4,95	
11	420	SX	7,35	7,47	
		DX	5,10	5,23	
12	460	SX	7,16	7,13	
		DX	5,54	5,52	
13	500	SX	7,30	7,28	
		DX	5,53	5,65	

(b)

		Con calibro			
P R O V I N O	3	N°	Punto (mm)		
				Misura prima cottura	Misura dopo cottura
1	0	SX	4,25	4,24	
		DX	4,55	4,50	
2	40	SX	4,14	4,14	
		DX	4,62	4,49	
3	80	SX	4,35	4,19	
		DX	4,75	4,59	
4	120	SX	4,31	4,21	
		DX	4,82	4,66	
5	160	SX	4,33	4,16	
		DX	4,72	4,66	
6	200	SX	4,21	4,08	
		DX	4,64	4,57	
7	250	SX	4,09	4,02	
		DX	4,33	4,30	
8	300	SX	4,31	4,15	
		DX	4,73	4,6	
9	340	SX	4,35	4,19	
		DX	5	4,92	
10	380	SX	4,44	4,37	
		DX	5,25	5,16	
11	420	SX	4,33	4,39	
		DX	5,31	5,35	
12	460	SX	4,21	4,28	
		DX	5,23	5,39	
13	500	SX	4,46	4,47	
		DX	5,37	5,41	

(c)

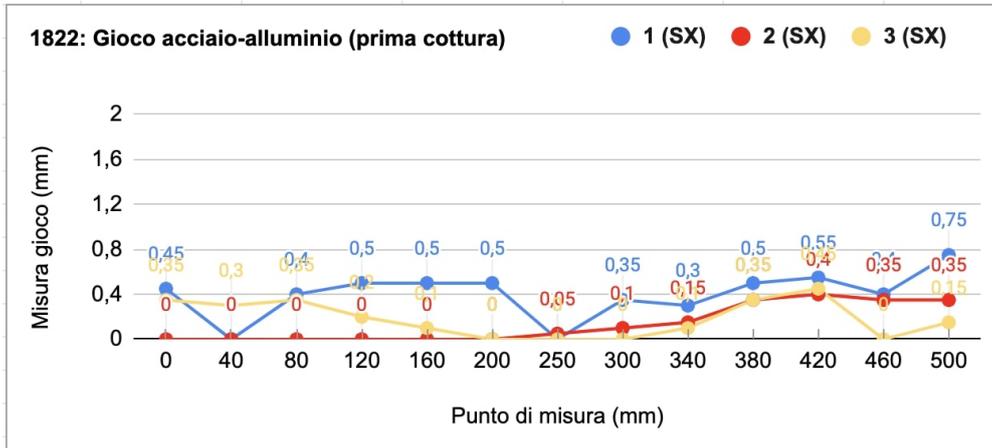
Figura 10.9: Tabelle riassuntive dei valori misurati dello spessore pacchetto lamiera con adesivo *Betamate 1424*: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

10.1.2 Confronto gioco acciaio-alluminio

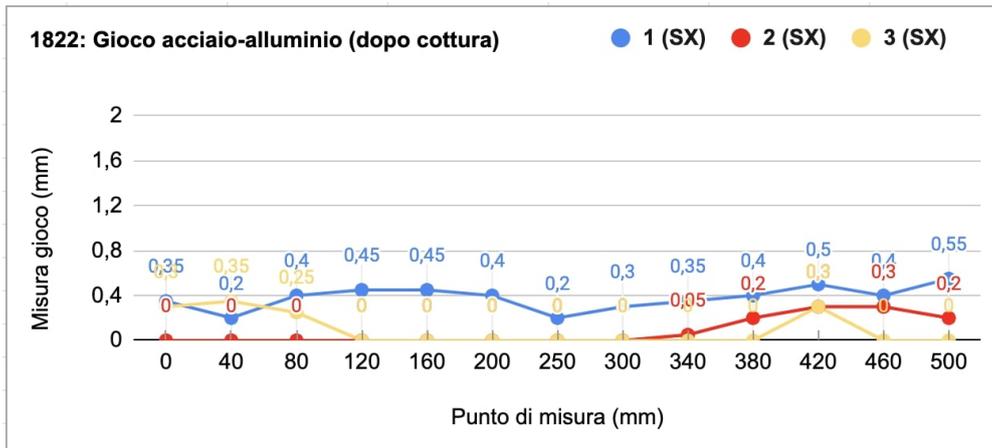
Di seguito sono riportati i valori dello spessore pacchetto ottenuti con i tre adesivi, per ogni provino. In particolare sono stati riportati in ogni diagramma i valori ottenuti per i tre provini, al variare del tipo di adesivo.

Le misurazioni effettuate nei provini realizzati con *Betamate 1822*, sia prima della cottura che dopo, sono mostrate in figura 10.10 e in figura 10.11 rispettivamente per il lato destro e sinistro. Le misurazioni effettuate nei provini realizzati con *Betamate 4600*, sia prima della cottura che dopo, sono mostrate in figura 10.12 e in figura 10.13 rispettivamente per il lato destro e sinistro. Infine, per i provini realizzati con *Betamate 1424* si rimanda alla figura 10.14 e alla figura 10.15 rispettivamente per il lato destro e sinistro.

Per un più facile confronto, i valori misurati in ogni punto sono stati riportati anche sotto forma di tabelle: figura 10.16 per l'adesivo *Betamate 1822*, figura 10.17 per l'adesivo *Betamate 4600* e figura 10.18 per l'adesivo *Betamate 1424*. Possiamo notare come l'adesivo *Betamate 4600*, specifico per i giunti in alluminio, presenti un comportamento migliore tra i tre adesivi. Infatti dopo la cottura dei provini si ottengono dei valori del gioco tra le lamiere inferiori al caso iniziale (evidenziati in verde), mentre i punti in cui il gioco è maggiore della condizione prima cottura (evidenziati in rosso) sono comunque in minor numero rispetto alle altre tipologie di adesivo.

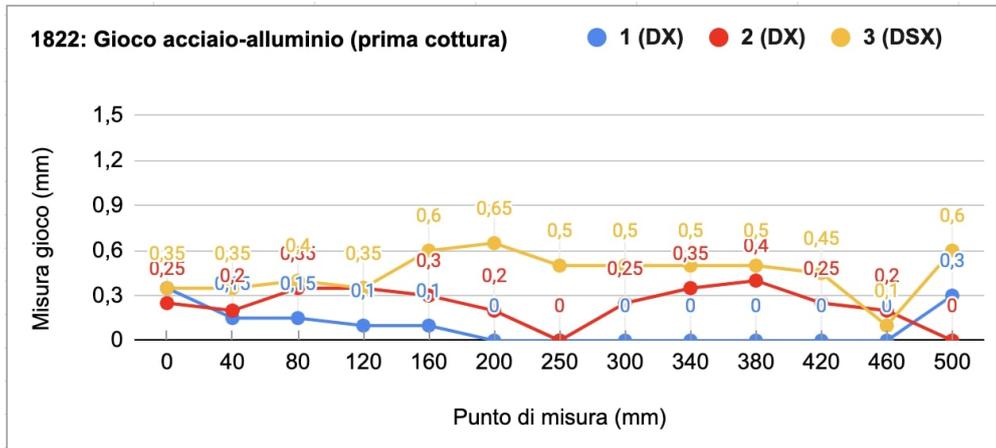


(a)

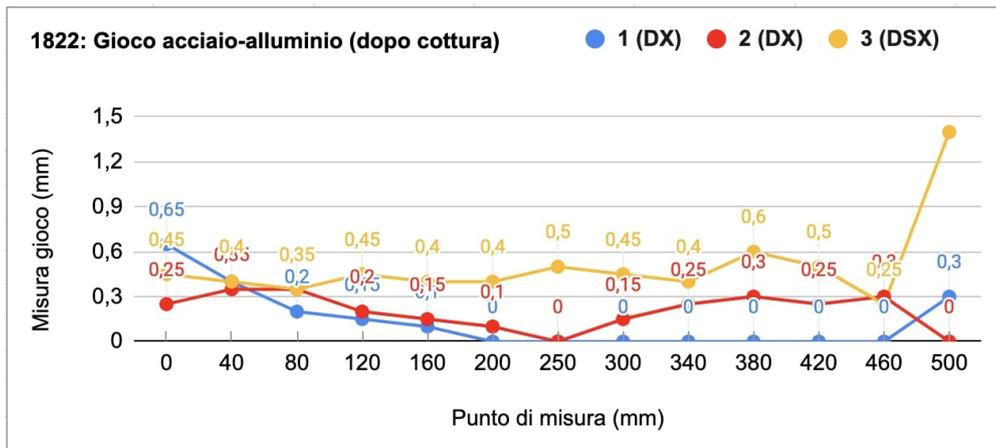


(b)

Figura 10.10: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo *Betamate 1822*, lato sinistro: a) prima cottura; b) dopo cottura.

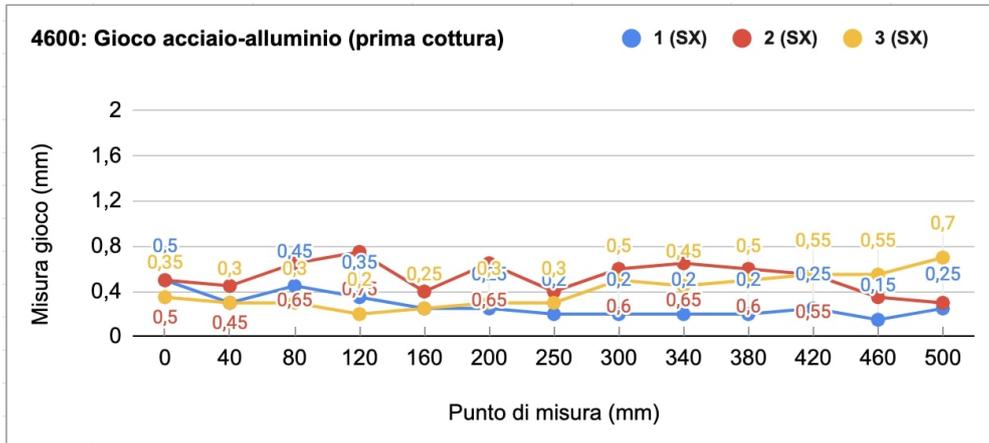


(a)

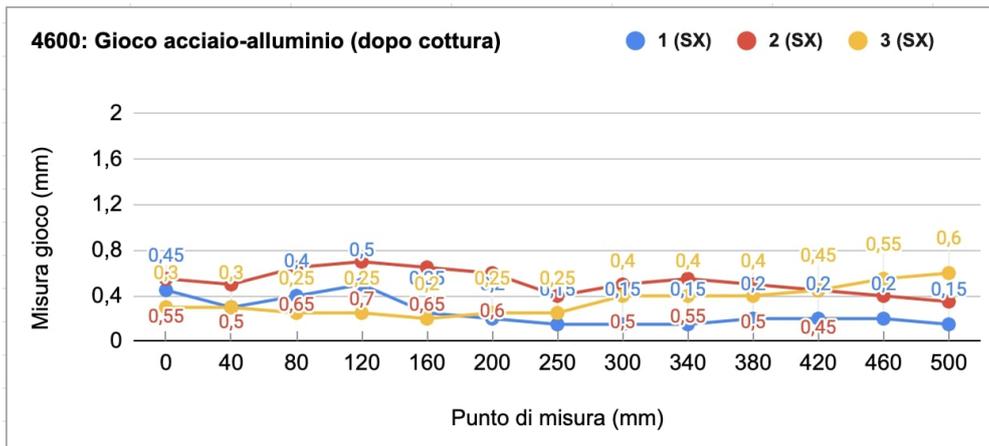


(b)

Figura 10.11: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo *Betamate 1822*, lato destro: a) prima cottura; b) dopo cottura.

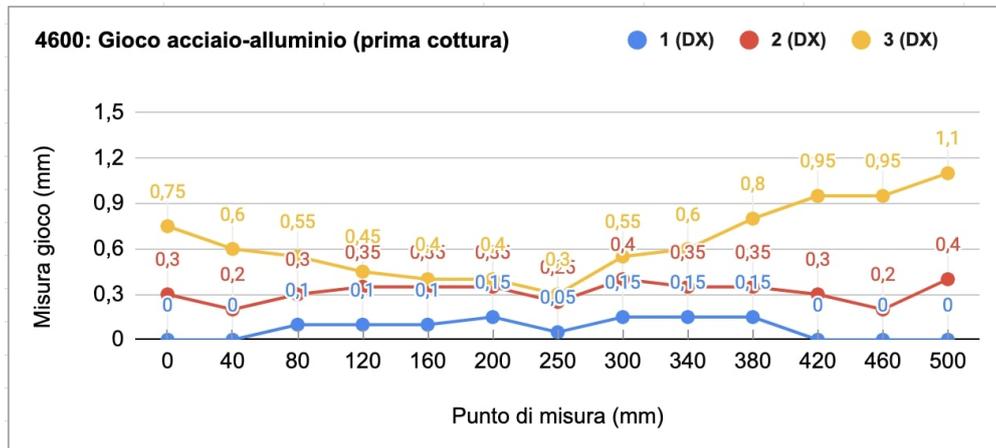


(a)

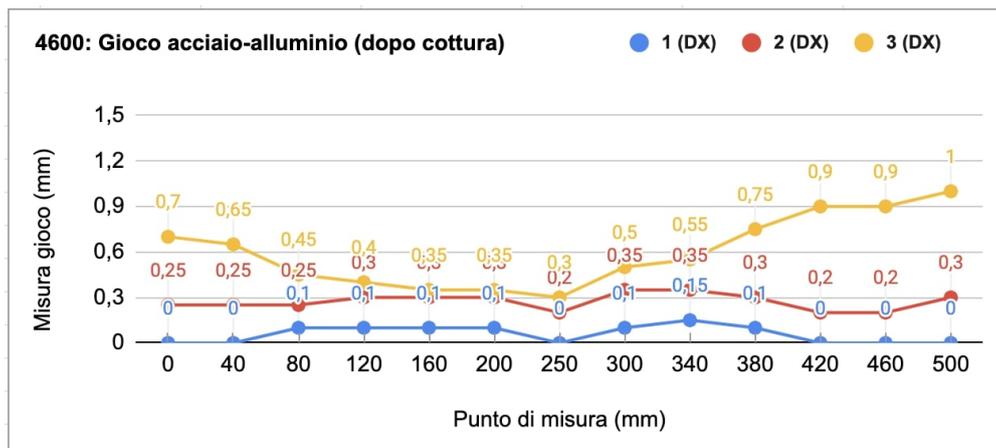


(b)

Figura 10.12: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo *Betamate 4600*, lato sinistro: a) prima cottura; b) dopo cottura.

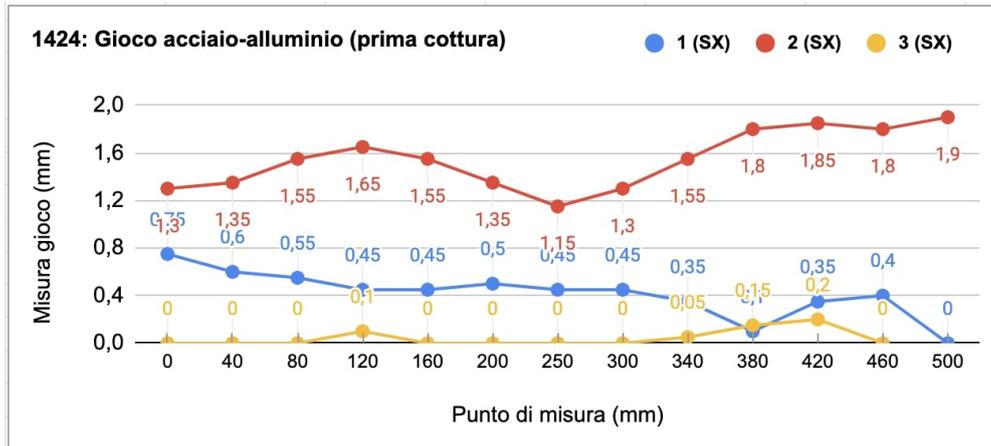


(a)

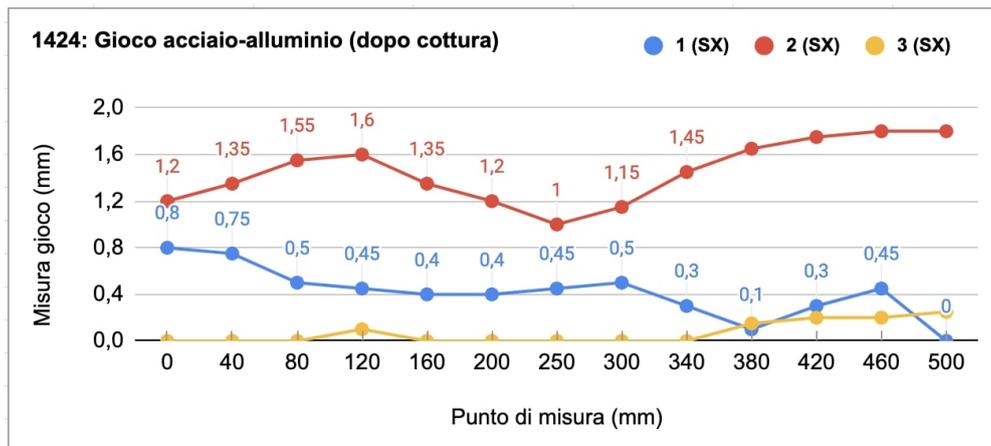


(b)

Figura 10.13: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo *Betamate 4600*, lato destro: a) prima cottura; b) dopo cottura.

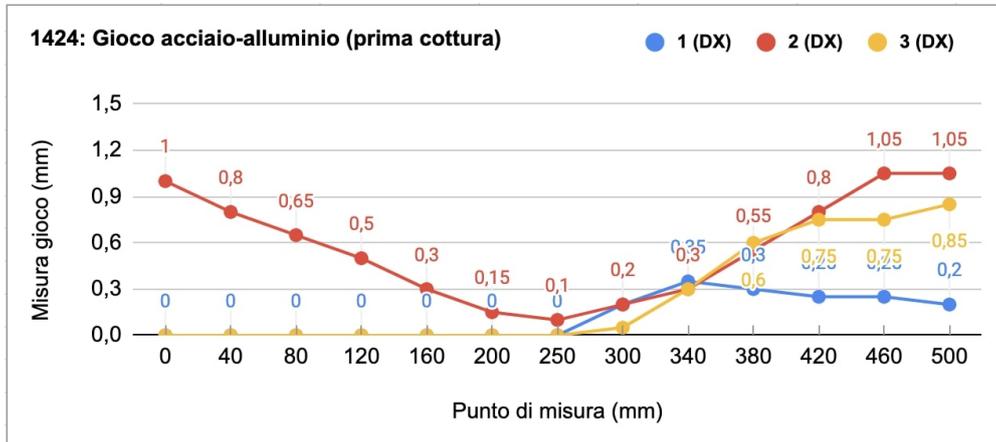


(a)

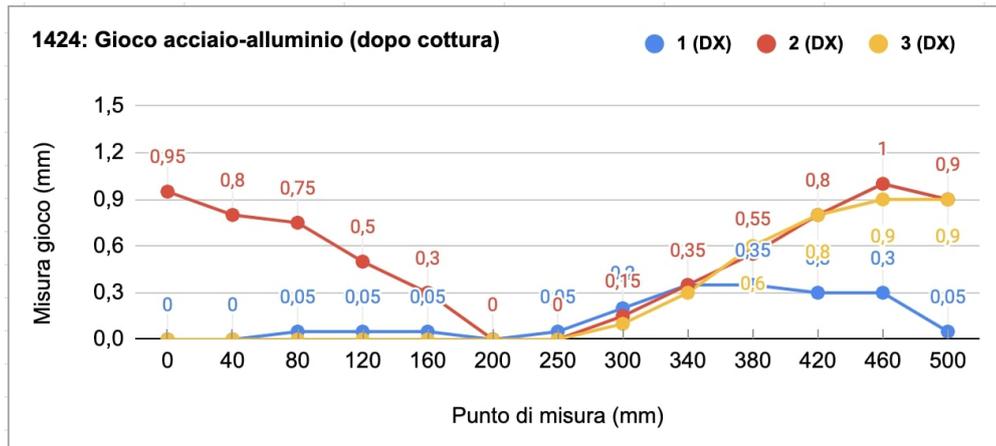


(b)

Figura 10.14: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo *Betamate 1424*, lato sinistro: a) prima cottura; b) dopo cottura.



(a)



(b)

Figura 10.15: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo *Betamate 1424*, lato destro: a) prima cottura; b) dopo cottura.

		Con spessimetro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Gioco acciaio-alluminio prima cottura	Gioco acciaio-alluminio dopo cottura	
1	1	0	SX	0,45	0,35
			DX	0,35	0,65
	2	40	SX	0,00	0,20
			DX	0,15	0,40
	3	80	SX	0,40	0,40
			DX	0,15	0,20
	4	120	SX	0,50	0,45
			DX	0,10	0,15
	5	160	SX	0,50	0,45
			DX	0,10	0,10
	6	200	SX	0,50	0,40
			DX	0,00	0,00
	7	250	SX	0,00	0,20
DX			0,00	0,00	
8	300	SX	0,35	0,3	
		DX	0	0	
9	340	SX	0,3	0,35	
		DX	0	0	
10	380	SX	0,5	0,4	
		DX	0	0	
11	420	SX	0,55	0,5	
		DX	0,00	0,00	
12	460	SX	0,40	0,40	
		DX	0,00	0,00	
13	500	SX	0,75	0,55	
		DX	0,30	0,30	

(a)

		Con spessimetro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Gioco acciaio-alluminio prima cottura	Gioco acciaio-alluminio dopo cottura	
2	1	0	SX	0,00	0,00
			DX	0,25	0,25
	2	40	SX	0,00	0,00
			DX	0,20	0,35
	3	80	SX	0,00	0,00
			DX	0,35	0,35
	4	120	SX	0,00	0,00
			DX	0,35	0,20
	5	160	SX	0,00	0,00
			DX	0,30	0,15
	6	200	SX	0,00	0,00
			DX	0,20	0,10
	7	250	SX	0,05	0,00
DX			0,00	0,00	
8	300	SX	0,1	0	
		DX	0,25	0,15	
9	340	SX	0,15	0,05	
		DX	0,35	0,25	
10	380	SX	0,35	0,2	
		DX	0,4	0,3	
11	420	SX	0,4	0,3	
		DX	0,25	0,25	
12	460	SX	0,35	0,30	
		DX	0,20	0,30	
13	500	SX	0,35	0,20	
		DX	0,00	0,00	

(b)

		Con spessimetro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Gioco acciaio-alluminio prima cottura	Gioco acciaio-alluminio dopo cottura	
3	1	0	SX	0,35	0,30
			DX	0,35	0,45
	2	40	SX	0,30	0,35
			DX	0,35	0,40
	3	80	SX	0,35	0,25
			DX	0,40	0,35
	4	120	SX	0,20	0,00
			DX	0,35	0,45
	5	160	SX	0,10	0,00
			DX	0,60	0,40
	6	200	SX	0,00	0,00
			DX	0,65	0,40
	7	250	SX	0,00	0,00
DX			0,50	0,50	
8	300	SX	0	0	
		DX	0,5	0,45	
9	340	SX	0,1	0	
		DX	0,5	0,4	
10	380	SX	0,35	0	
		DX	0,5	0,6	
11	420	SX	0,45	0,3	
		DX	0,45	0,50	
12	460	SX	0,00	0,00	
		DX	0,10	0,25	
13	500	SX	0,15	0,00	
		DX	0,60	1,40	

(c)

Figura 10.16: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio con adesivo *Betamate 1822*: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

10.1 – Risultati

		Con spessimetro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Gioco	Gioco	
			acciaio-alluminio prima cottura	acciaio-alluminio dopo cottura	
1	1	0	SX	0,50	0,45
			DX	0,00	0,00
	2	40	SX	0,30	0,30
			DX	0,00	0,00
	3	80	SX	0,45	0,40
			DX	0,10	0,10
	4	120	SX	0,35	0,50
			DX	0,10	0,10
	5	160	SX	0,25	0,25
			DX	0,10	0,10
	6	200	SX	0,25	0,20
			DX	0,15	0,10
	7	250	SX	0,20	0,15
DX			0,05	0,00	
8	300	SX	0,2	0,15	
		DX	0,15	0,1	
9	340	SX	0,2	0,15	
		DX	0,15	0,15	
10	380	SX	0,2	0,2	
		DX	0,15	0,1	
11	420	SX	0,25	0,2	
		DX	0,00	0,00	
12	460	SX	0,15	0,20	
		DX	0,00	0,00	
13	500	SX	0,25	0,15	
		DX	0,00	0,00	

		Con spessimetro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Gioco	Gioco	
			acciaio-alluminio prima cottura	acciaio-alluminio dopo cottura	
2	1	0	SX	0,50	0,55
			DX	0,30	0,25
	2	40	SX	0,45	0,50
			DX	0,20	0,25
	3	80	SX	0,65	0,65
			DX	0,30	0,25
	4	120	SX	0,75	0,70
			DX	0,35	0,30
	5	160	SX	0,40	0,65
			DX	0,35	0,30
	6	200	SX	0,65	0,60
			DX	0,35	0,30
	7	250	SX	0,40	0,40
DX			0,25	0,20	
8	300	SX	0,6	0,5	
		DX	0,4	0,35	
9	340	SX	0,65	0,55	
		DX	0,35	0,35	
10	380	SX	0,6	0,5	
		DX	0,35	0,3	
11	420	SX	0,55	0,45	
		DX	0,30	0,20	
12	460	SX	0,35	0,40	
		DX	0,20	0,20	
13	500	SX	0,30	0,35	
		DX	0,40	0,30	

(a)

(b)

		Con spessimetro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Gioco	Gioco	
			acciaio-alluminio prima cottura	acciaio-alluminio dopo cottura	
3	1	0	SX	0,35	0,30
			DX	0,75	0,70
	2	40	SX	0,30	0,30
			DX	0,60	0,65
	3	80	SX	0,30	0,25
			DX	0,55	0,45
	4	120	SX	0,20	0,25
			DX	0,45	0,40
	5	160	SX	0,25	0,20
			DX	0,40	0,35
	6	200	SX	0,30	0,25
			DX	0,40	0,35
	7	250	SX	0,30	0,25
DX			0,30	0,30	
8	300	SX	0,5	0,4	
		DX	0,55	0,5	
9	340	SX	0,45	0,4	
		DX	0,6	0,55	
10	380	SX	0,5	0,4	
		DX	0,8	0,75	
11	420	SX	0,55	0,45	
		DX	0,95	0,90	
12	460	SX	0,55	0,55	
		DX	0,95	0,90	
13	500	SX	0,70	0,60	
		DX	1,10	1,00	

(c)

Figura 10.17: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio con adesivo *Betamate 4600*: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

Con spessimetro					
P R O V I N O	N°	Punto (mm)		Gioco acciaio-alluminio	
				prima cottura	dopo cottura
1	1	0	SX	0,75	0,80
			DX	0,00	0,00
	2	40	SX	0,60	0,75
			DX	0,00	0,00
	3	80	SX	0,55	0,50
			DX	0,00	0,05
	4	120	SX	0,45	0,45
			DX	0,00	0,05
	5	160	SX	0,45	0,40
			DX	0,00	0,05
	6	200	SX	0,50	0,40
			DX	0,00	0,00
	7	250	SX	0,45	0,45
DX			0,00	0,05	
8	300	SX	0,45	0,5	
		DX	0,2	0,2	
9	340	SX	0,35	0,3	
		DX	0,35	0,35	
10	380	SX	0,1	0,1	
		DX	0,3	0,35	
11	420	SX	0,35	0,3	
		DX	0,25	0,30	
12	460	SX	0,40	0,45	
		DX	0,25	0,30	
13	500	SX	0,00	0,00	
		DX	0,20	0,05	

(a)

Con spessimetro					
P R O V I N O	N°	Punto (mm)		Gioco acciaio-alluminio	
				prima cottura	dopo cottura
2	1	0	SX	1,30	1,20
			DX	1,00	0,95
	2	40	SX	1,35	1,35
			DX	0,80	0,80
	3	80	SX	1,55	1,55
			DX	0,65	0,75
	4	120	SX	1,65	1,60
			DX	0,50	0,50
	5	160	SX	1,55	1,35
			DX	0,30	0,30
	6	200	SX	1,35	1,20
			DX	0,15	0,00
	7	250	SX	1,15	1,00
DX			0,10	0,00	
8	300	SX	1,3	1,15	
		DX	0,2	0,15	
9	340	SX	1,55	1,45	
		DX	0,3	0,35	
10	380	SX	1,8	1,65	
		DX	0,55	0,55	
11	420	SX	1,85	1,75	
		DX	0,80	0,80	
12	460	SX	1,80	1,80	
		DX	1,05	1,00	
13	500	SX	1,90	1,80	
		DX	1,05	0,90	

(b)

Con spessimetro					
P R O V I N O	N°	Punto (mm)		Gioco acciaio-alluminio	
				prima cottura	dopo cottura
3	1	0	SX	0,00	0,00
			DX	0,00	0,00
	2	40	SX	0,00	0,00
			DX	0,00	0,00
	3	80	SX	0,00	0,00
			DX	0,00	0,00
	4	120	SX	0,10	0,10
			DX	0,00	0,00
	5	160	SX	0,00	0,00
			DX	0,00	0,00
	6	200	SX	0,00	0,00
			DX	0,00	0,00
	7	250	SX	0,00	0,00
DX			0,00	0,00	
8	300	SX	0	0	
		DX	0,05	0,1	
9	340	SX	0,05	0	
		DX	0,3	0,3	
10	380	SX	0,15	0,15	
		DX	0,6	0,6	
11	420	SX	0,2	0,2	
		DX	0,75	0,80	
12	460	SX	0,00	0,20	
		DX	0,75	0,90	
13	500	SX	0,25	0,25	
		DX	0,85	0,90	

(c)

Figura 10.18: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio con adesivo *Betamate 1424*: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

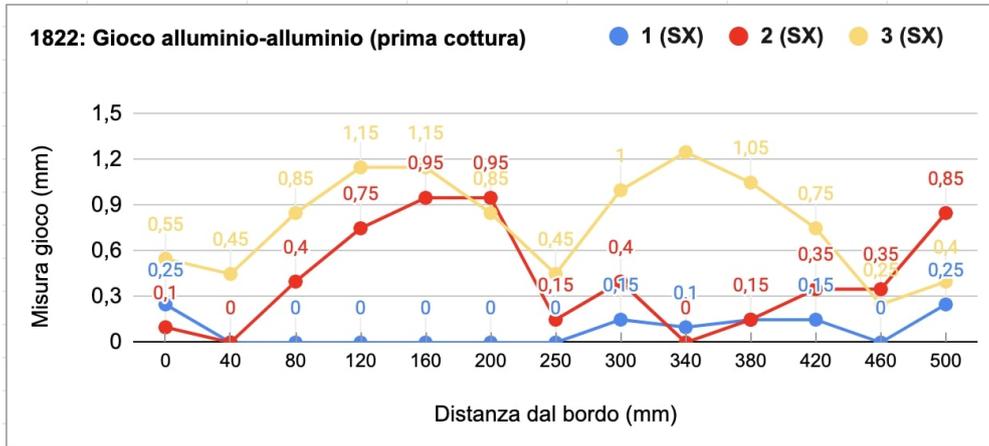
10.1.3 Confronto gioco alluminio-alluminio

Le misurazioni effettuate nei provini realizzati con *Betamate 1822*, sia prima della cottura che dopo, sono mostrate in figura 10.19 e in figura 10.20, rispettivamente per il lato destro e sinistro. Le misurazioni effettuate nei provini realizzati con *Betamate 4600*, sia prima della cottura che dopo, sono mostrate in figura 10.21 e in figura 10.22 rispettivamente per il lato destro e sinistro. Infine, per i provini realizzati con *Betamate 1424* si rimanda alla figura 10.23 e alla figura 10.24 rispettivamente per il lato destro e sinistro.

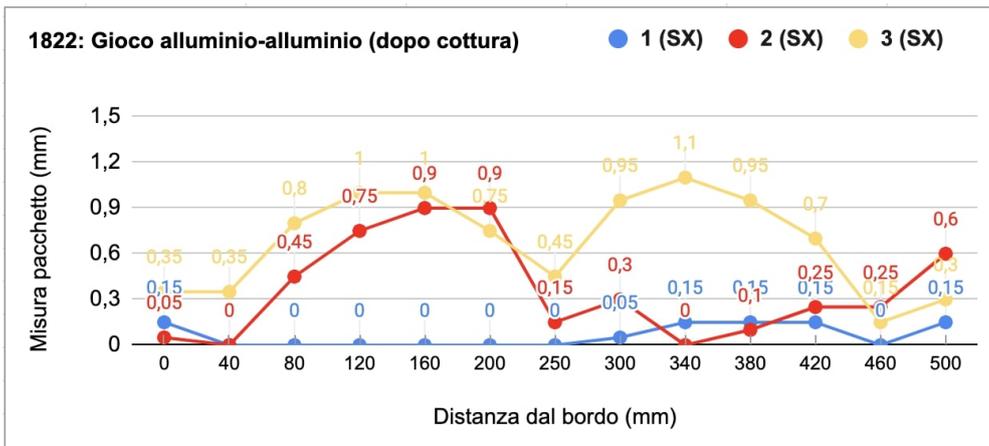
In particolare sono stati riportati in ogni diagramma i valori ottenuti per i tre provini, al variare del tipo di adesivo.

Per un più facile confronto, i valori misurati in ogni punto sono stati riportati anche sotto forma di tabelle: figura 10.25 per l'adesivo *Betamate 1822*, figura 10.26 per l'adesivo *Betamate 4600* e figura 10.27 per l'adesivo *Betamate 1424*.

Per tutte e tre le tipologie di adesivo si può dire che si hanno dei buoni risultati: i valori dopo cottura sono sostanzialmente sempre inferiori rispetto al caso prima della cottura. Anche in questo caso l'adesivo *Betamate 4600* ha un comportamento migliore rispetto agli altri, sia per il comportamento dopo la cottura dei provini sia per i valori massimi di gioco raggiunti.

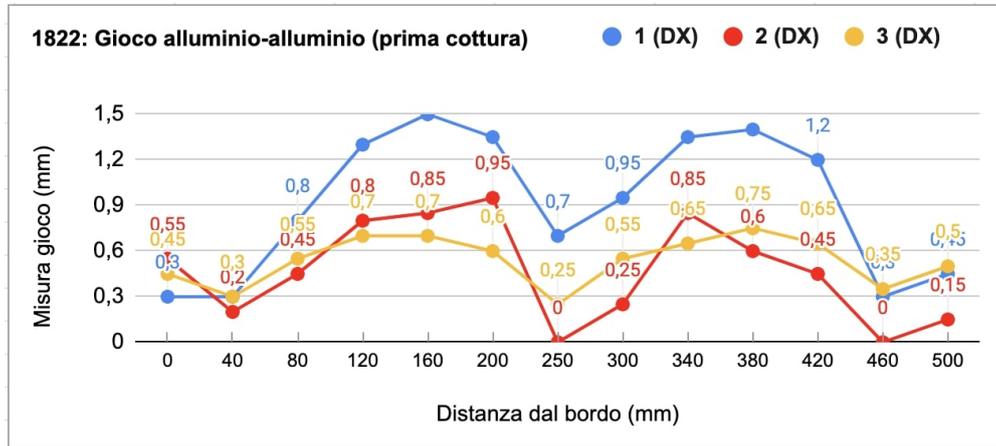


(a)

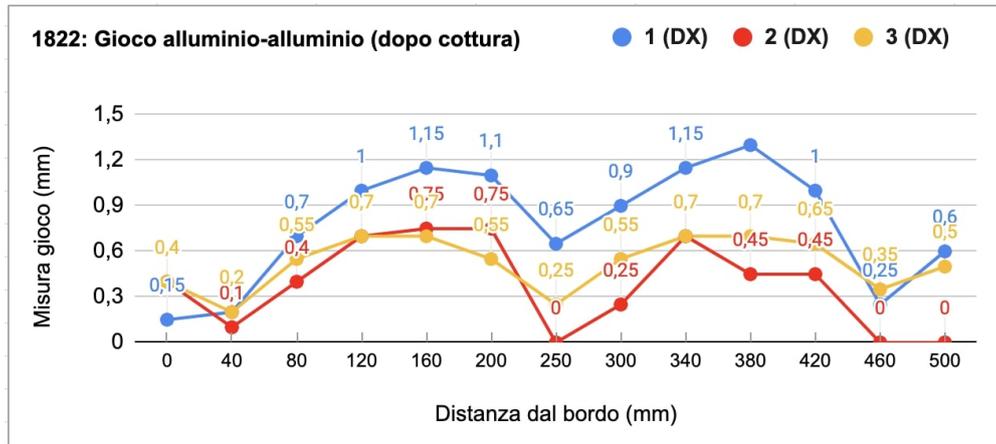


(b)

Figura 10.19: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio per l'adesivo *Betamate 1822*, lato sinistro: a) prima cottura; b) dopo cottura.

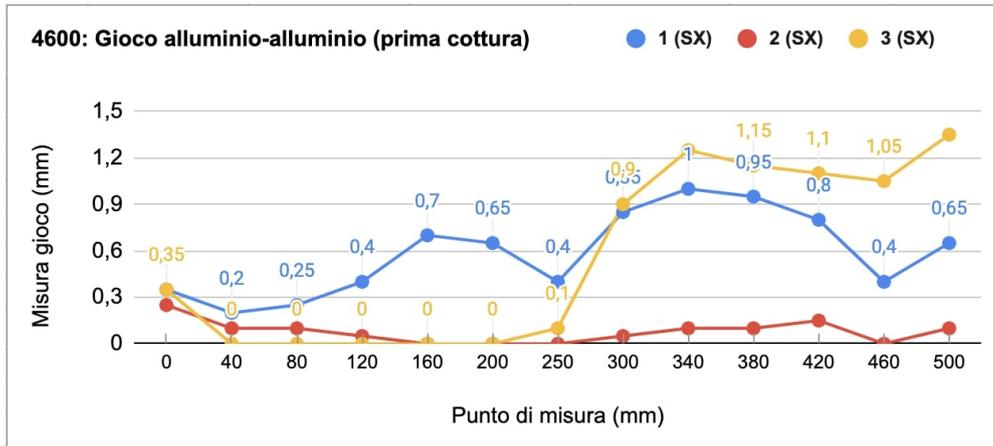


(a)

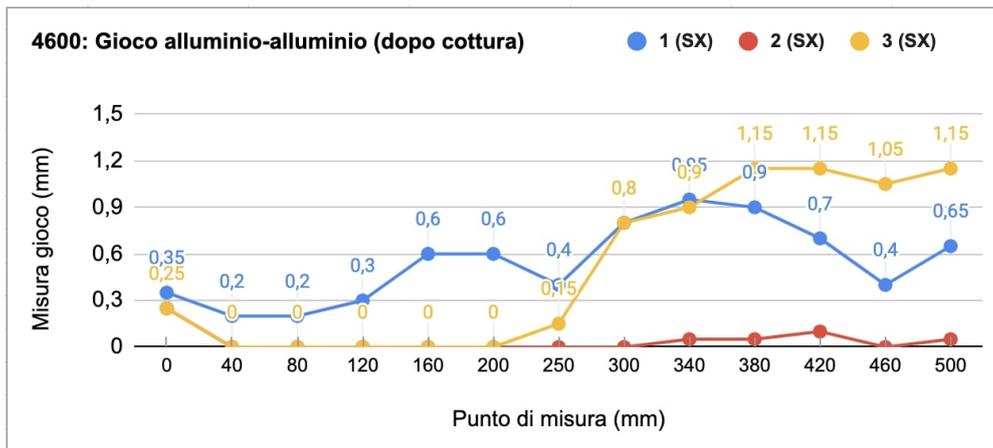


(b)

Figura 10.20: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio per l'adesivo *Betamate 1822*, lato destro: a) prima cottura; b) dopo cottura.

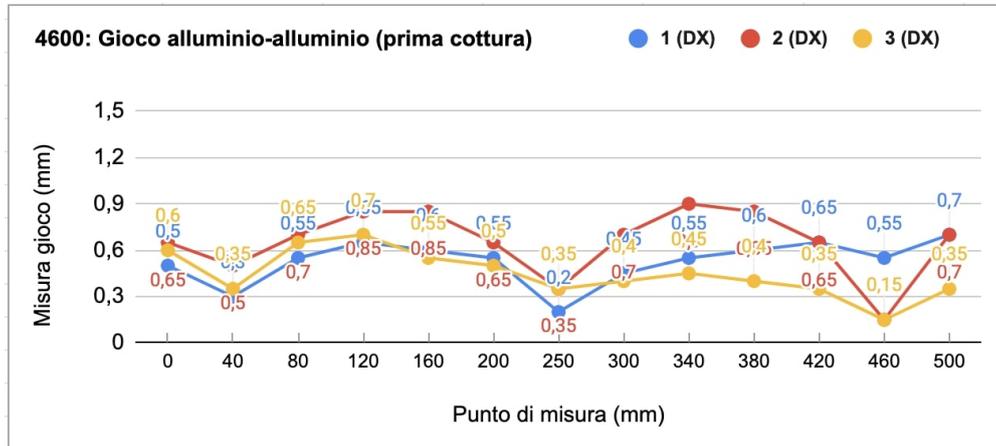


(a)

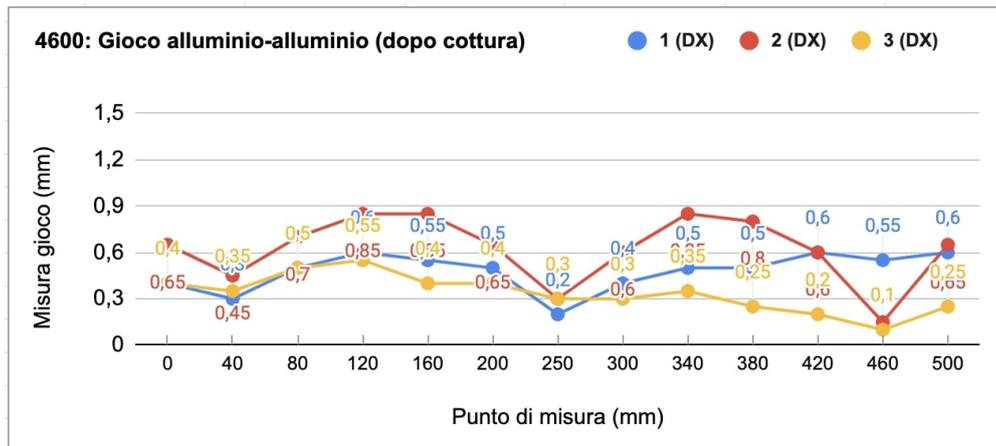


(b)

Figura 10.21: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio per l'adesivo *Betamate 4600*, lato sinistro: a) prima cottura; b) dopo cottura.

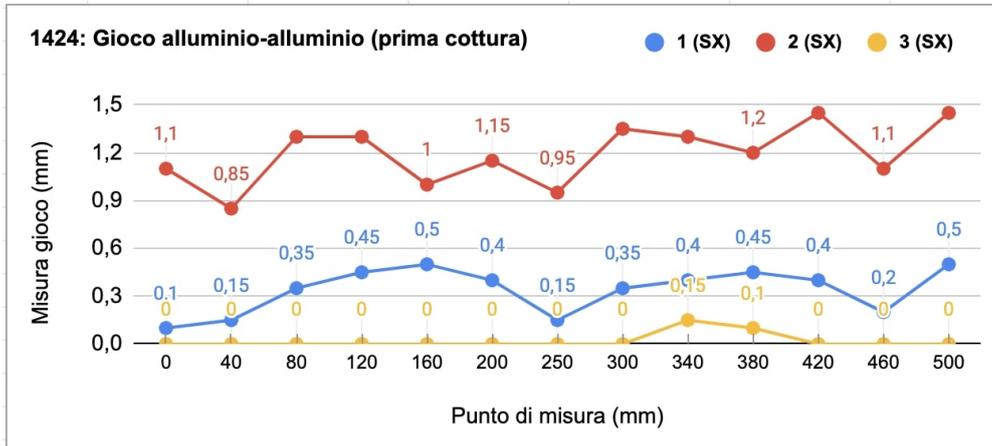


(a)

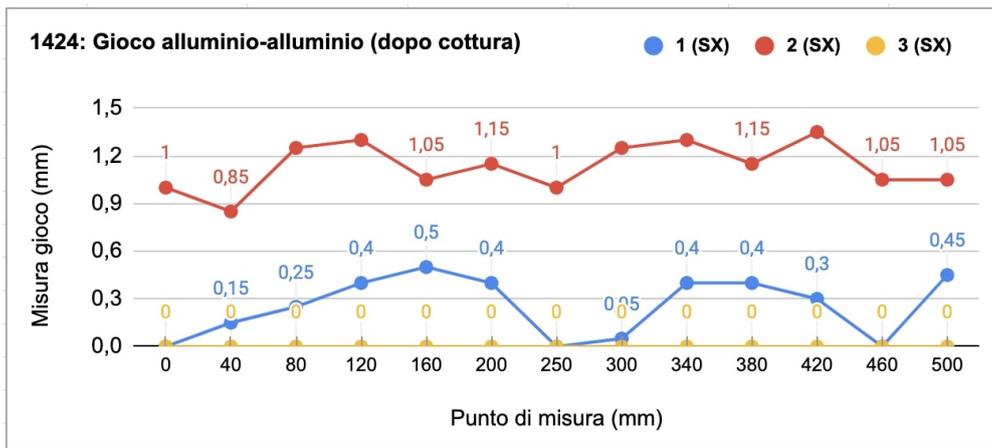


(b)

Figura 10.22: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco acciaio-alluminio per l'adesivo *Betamate 4600*, lato destro: a) prima cottura; b) dopo cottura.

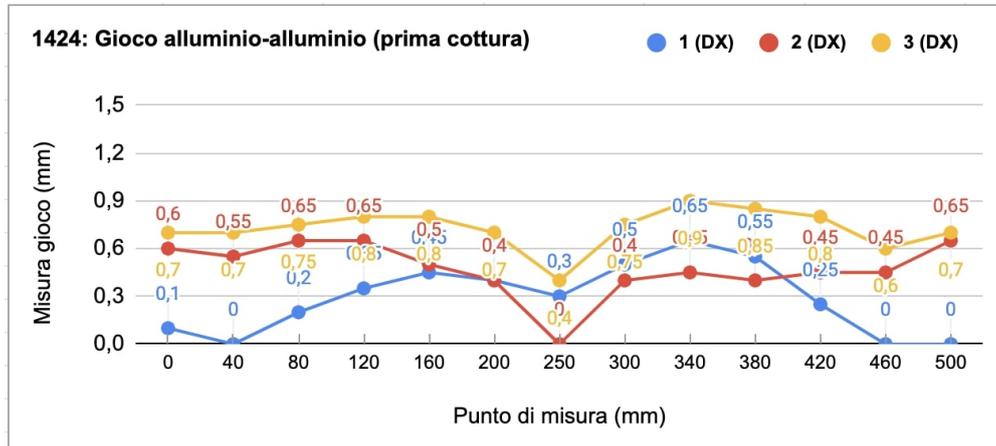


(a)

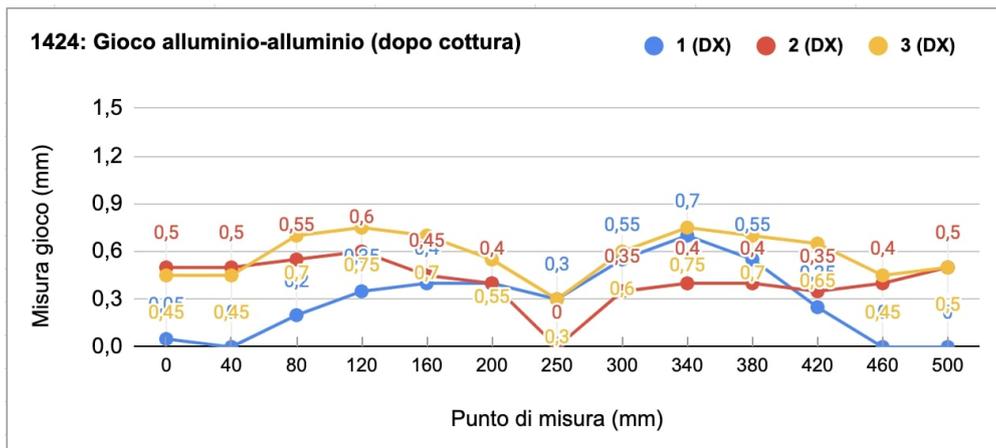


(b)

Figura 10.23: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio per l'adesivo *Betamate 1424*, lato sinistro: a) prima cottura; b) dopo cottura.



(a)



(b)

Figura 10.24: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio per l'adesivo *Betamate 1424*, lato destro: a) prima cottura; b) dopo cottura.

		Con spessimetro			
PROVINO	N°	Punto (mm)	Gioco alluminio-alluminio		
			prima cottura	o dopo cottura	
1	1	0	SX	0,25	0,15
			DX	0,3	0,15
	2	40	SX	0	0
			DX	0,3	0,2
	3	80	SX	0	0
			DX	0,8	0,7
	4	120	SX	0	0
			DX	1,3	1
	5	160	SX	0	0
			DX	1,5	1,15
	6	200	SX	0	0
			DX	1,35	1,1
	7	250	SX	0	0
			DX	0,7	0,65
	8	300	SX	0,15	0,05
			DX	0,95	0,9
	9	340	SX	0,1	0,15
			DX	1,35	1,15
	10	380	SX	0,15	0,15
			DX	1,4	1,3
	11	420	SX	0,15	0,15
			DX	1,2	1
	12	460	SX	0	0
			DX	0,3	0,25
13	500	SX	0,25	0,15	
		DX	0,45	0,6	

(a)

		Con spessimetro			
PROVINO	N°	Punto (mm)	Gioco alluminio-alluminio		
			prima cottura	o dopo cottura	
2	1	0	SX	0,1	0,05
			DX	0,55	0,4
	2	40	SX	0	0
			DX	0,2	0,1
	3	80	SX	0,4	0,45
			DX	0,45	0,4
	4	120	SX	0,75	0,75
			DX	0,8	0,7
	5	160	SX	0,95	0,9
			DX	0,85	0,75
	6	200	SX	0,95	0,9
			DX	0,95	0,75
	7	250	SX	0,15	0,15
			DX	0	0
	8	300	SX	0,4	0,3
			DX	0,25	0,25
	9	340	SX	0	0
			DX	0,85	0,7
	10	380	SX	0,15	0,1
			DX	0,6	0,45
	11	420	SX	0,35	0,25
			DX	0,45	0,45
	12	460	SX	0,35	0,25
			DX	0	0
13	500	SX	0,85	0,6	
		DX	0,15	0	

(b)

		Con spessimetro			
PROVINO	N°	Punto (mm)	Gioco alluminio-alluminio		
			prima cottura	o dopo cottura	
3	1	0	SX	0,55	0,35
			DX	0,45	0,4
	2	40	SX	0,45	0,35
			DX	0,3	0,2
	3	80	SX	0,85	0,8
			DX	0,55	0,55
	4	120	SX	1,15	1
			DX	0,7	0,7
	5	160	SX	1,15	1
			DX	0,7	0,7
	6	200	SX	0,85	0,75
			DX	0,6	0,55
	7	250	SX	0,45	0,45
			DX	0,25	0,25
	8	300	SX	1	0,95
			DX	0,55	0,55
	9	340	SX	1,25	1,1
			DX	0,65	0,7
	10	380	SX	1,05	0,95
			DX	0,75	0,7
	11	420	SX	0,75	0,7
			DX	0,65	0,65
	12	460	SX	0,25	0,15
			DX	0,35	0,35
13	500	SX	0,4	0,3	
		DX	0,5	0,5	

(c)

Figura 10.25: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio con adesivo *Betamate 1822*: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

		Con spessimetro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)		Gioco	Gioco
				alluminio-alluminio prima cottura	alluminio-alluminio dopo cottura
1	1	0	SX	0,35	0,35
			DX	0,5	0,4
	2	40	SX	0,2	0,2
			DX	0,3	0,3
	3	80	SX	0,25	0,2
			DX	0,55	0,5
	4	120	SX	0,4	0,3
			DX	0,65	0,6
	5	160	SX	0,7	0,6
			DX	0,6	0,55
	6	200	SX	0,65	0,6
			DX	0,55	0,5
	7	250	SX	0,4	0,4
DX			0,2	0,2	
8	300	SX	0,85	0,8	
		DX	0,45	0,4	
9	340	SX	1	0,95	
		DX	0,55	0,5	
10	380	SX	0,95	0,9	
		DX	0,6	0,5	
11	420	SX	0,8	0,7	
		DX	0,65	0,6	
12	460	SX	0,4	0,4	
		DX	0,55	0,55	
13	500	SX	0,65	0,65	
		DX	0,7	0,6	

		Con spessimetro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)		Gioco	Gioco
				alluminio-alluminio prima cottura	alluminio-alluminio dopo cottura
2	1	0	SX	0,25	0,25
			DX	0,65	0,65
	2	40	SX	0,1	0
			DX	0,5	0,45
	3	80	SX	0,1	0
			DX	0,7	0,7
	4	120	SX	0,05	0
			DX	0,85	0,85
	5	160	SX	0	0
			DX	0,85	0,85
	6	200	SX	0	0
			DX	0,65	0,65
	7	250	SX	0	0
DX			0,35	0,3	
8	300	SX	0,05	0	
		DX	0,7	0,6	
9	340	SX	0,1	0,05	
		DX	0,9	0,85	
10	380	SX	0,1	0,05	
		DX	0,85	0,8	
11	420	SX	0,15	0,1	
		DX	0,65	0,6	
12	460	SX	0	0	
		DX	0,15	0,15	
13	500	SX	0,1	0,05	
		DX	0,2	0,65	

(a)

(b)

		Con spessimetro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)		Gioco	Gioco
				alluminio-alluminio prima cottura	alluminio-alluminio dopo cottura
3	1	0	SX	0,35	0,25
			DX	0,6	0,4
	2	40	SX	0	0
			DX	0,35	0,35
	3	80	SX	0	0
			DX	0,65	0,5
	4	120	SX	0	0
			DX	0,7	0,55
	5	160	SX	0,55	0,4
			DX	0	0
	6	200	SX	0	0
			DX	0,5	0,4
	7	250	SX	0,1	0,15
DX			0,35	0,3	
8	300	SX	0,9	0,8	
		DX	0,4	0,3	
9	340	SX	1,25	0,9	
		DX	0,45	0,35	
10	380	SX	1,15	1,15	
		DX	0,4	0,25	
11	420	SX	1,1	1,15	
		DX	0,35	0,2	
12	460	SX	1,05	1,05	
		DX	0,15	0,1	
13	500	SX	1,35	1,15	
		DX	0,35	0,25	

(c)

Figura 10.26: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio con adesivo *Betamate 4600*: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

Risultati prove di dilatazione termica differenziata

		Con spessimetro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Gioco		
			alluminio-alluminio prima cottura	alluminio-alluminio dopo cottura	
1	1	0	SX	0,1	0
			DX	0,1	0,05
	2	40	SX	0,15	0,15
			DX	0	0
	3	80	SX	0,35	0,25
			DX	0,2	0,2
	4	120	SX	0,45	0,4
			DX	0,35	0,35
	5	160	SX	0,5	0,5
			DX	0,45	0,4
	6	200	SX	0,4	0,4
			DX	0,4	0,4
	7	250	SX	0,15	0
DX			0,3	0,3	
8	300	SX	0,35	0,05	
		DX	0,5	0,55	
9	340	SX	0,4	0,4	
		DX	0,65	0,7	
10	380	SX	0,45	0,4	
		DX	0,55	0,55	
11	420	SX	0,4	0,3	
		DX	0,25	0,25	
12	460	SX	0,2	0	
		DX	0	0	
13	500	SX	0,5	0,45	
		DX	0	0	

(a)

		Con spessimetro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Gioco		
			alluminio-alluminio prima cottura	alluminio-alluminio prima cottura	
2	1	0	SX	1,1	1
			DX	0,6	0,5
	2	40	SX	0,85	0,85
			DX	0,55	0,5
	3	80	SX	1,3	1,25
			DX	0,65	0,55
	4	120	SX	1,3	1,3
			DX	0,65	0,6
	5	160	SX	1	1,05
			DX	0,5	0,45
	6	200	SX	1,15	1,15
			DX	0,4	0,4
	7	250	SX	0,95	1
DX			0	0	
8	300	SX	1,35	1,25	
		DX	0,4	0,35	
9	340	SX	1,3	1,3	
		DX	0,45	0,4	
10	380	SX	1,2	1,15	
		DX	0,4	0,4	
11	420	SX	1,45	1,35	
		DX	0,45	0,35	
12	460	SX	1,1	1,05	
		DX	0,45	0,4	
13	500	SX	1,45	1,05	
		DX	0,65	0,5	

(b)

		Con spessimetro			
P R O V I N O	N°	Punto (mm)	Gioco		
			alluminio-alluminio prima cottura	alluminio-alluminio prima cottura	
3	1	0	SX	0	0
			DX	0,7	0,45
	2	40	SX	0	0
			DX	0,7	0,45
	3	80	SX	0	0
			DX	0,75	0,7
	4	120	SX	0	0
			DX	0,8	0,75
	5	160	SX	0	0
			DX	0,8	0,7
	6	200	SX	0	0
			DX	0,7	0,55
	7	250	SX	0	0
DX			0,4	0,3	
8	300	SX	0	0	
		DX	0,75	0,6	
9	340	SX	0,15	0	
		DX	0,9	0,75	
10	380	SX	0,1	0	
		DX	0,85	0,7	
11	420	SX	0	0	
		DX	0,8	0,65	
12	460	SX	0	0	
		DX	0,6	0,45	
13	500	SX	0	0	
		DX	0,7	0,5	

(c)

Figura 10.27: Tabelle riassuntive dei valori misurati del gioco alluminio-alluminio con adesivo *Betamate 1424*: a) provino 1; b) provino 2; c) provino 3.

10.1.4 Verifica con DSC

La prova DSC effettuata ha permesso la valutazione della temperatura di reticolazione e del tempo, per ognuno degli adesivi analizzati. Come è stato osservato nella figura 8.2 del capitolo 8.2.1 l'adesivo *Betamate 4600* inizia la reticolazione prima. I valori della temperatura e tempo di inizio reticolazione, estrapolati dal grafico di figura 8.2 nel capitolo 8.2.1, sono riportati nella tabella 10.1.

	Temperatura	Tempo (min)
Betamate 1822	172°C	15
Betamate 1424	163°C	14
Betamate 4600	163°C	14

Tabella 10.1: Valori della temperatura e tempo di inizio reticolazione, per i tre adesivi.

Questo risultato tende a verificare e confermare i risultati ottenuti con le prove di dilatazione termica, in cui si evince come l'adesivo *Betamate 4600*, specifico per i giunti in alluminio, riesca a compensare meglio le dilatazioni tra le lamiere: vi sono più punti di misura, rispetto agli altri adesivi, in cui i valori numerici del gioco acciaio-alluminio dopo cottura sono inferiori ai valori prima cottura. Con la DSC è stato quindi possibile dare una spiegazione del miglior comportamento del *Betamate 4600*, il quale reticolando prima fissa le lamiere che non potranno dilatarsi di conseguenza.

10.2 Conclusioni

Il lavoro svolto ha permesso di conoscere meglio il comportamento delle dilatazioni termiche delle lamiere di acciaio e alluminio nei giunti ibridi. I risultati migliori, dal punto di vista di contenimento delle dilatazioni termiche delle lamiere, si ottengono con l'adesivo *Betamate 4600* specifico per i giunti in alluminio.

Nonostante il migliore comportamento dell'adesivo *Betamate 4600*, la progettazione di tali giunti in ambito automotive però non è così semplice. Di seguito verranno delineate delle linee guida da considerare durante la progettazione delle giunzioni:

- posizione del giunto: è importante sapere dove andrà collocato il giunto, in particolare se in una zona estetica o non. La zona estetica sarà sicuramente più critica in quanto eventuali deformazioni del giunto determineranno dei difetti visibili (fessionamenti).
- montabilità di altri componenti: nell'insieme vettura il giunto potrebbe interfacciarsi con altri componenti, ad esempio le guarnizioni. Tali zone sono

sicuramente più critiche dal punto di vista del risultato da ottenere e necessitano di un maggior riguardo durante la progettazione. Questo perché la presenza di deformazioni del giunto possono inficiare la funzionalità e la montabilità dei componenti.

- Tolleranze di forma delle lamiere: lamiere non perfettamente accoppiate, a causa di tolleranze non idonee, possono determinare dei valori dello spessore del pacchetto lamiera elevati a seguito di un errato comportamento degli elementi di giunzione, adesivo e rivetto (esempio provino 3 realizzato con *Betamate 4600* nel capitolo 7.3.1). Infatti, se l'accoppiamento tra le superfici presenta delle differenze di planarità, l'adesivo e il rivetto risulterebbero sottodimensionati e non riuscirebbero a contenere le dilatazioni delle lamiere. L'utilizzo di lamiere non perfettamente accoppiate può determinare un giunto con caratteristiche meccaniche inferiori. Infatti, la maggiore resistenza di un giunto realizzato con adesivo si ha quando la distanza tra le lamiere è minima.
- Passo dei rivetti: dagli andamenti delle misurazioni ricavate in tale studio, è possibile notare come nei punti di misura compresi tra due rivetti si riscontrano dei valori variabili sia dello spessore pacchetto sia dei giochi. Diminuendo il passo dei rivetti, quindi aumentandone il numero, le dilatazioni possano essere più controllate e vincolate da questi fissaggi.

10.3 Sviluppi futuri

Il lavoro svolto in questa tesi può essere ulteriormente migliorato sotto diversi punti di vista:

- Posizionamento dei rivetti: potrebbe essere interessante valutare come la riduzione della distanza tra i rivetti influenza la dilatazione e il ritorno elastico delle lamiere;
- Forma profilati: potrebbe essere utile valutare la presenza delle dilatazioni termiche variando la configurazione delle lamiere dal punto di vista della forma dei profilati;
- Materiali provini: in questo studio di tesi sono state utilizzate due lamiere in alluminio e una in acciaio. Potrebbe essere verificare il comportamento dei provini costituiti, ad esempio, da due lamiere in acciaio e una in alluminio.

Bibliografia

- [1] EPA - United States Environmental Protection Agency. *Light-Duty Automotive Technology, Carbon Dioxide Emissions, and Fuel Economy Trends: 1975 Through 2017 - Executive Summary*. 2018. URL: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P100TGLC.pdf> (cit. alle pp. iii, 29).
- [2] Avisa Federchimica. *The aluminium automotive manual*. 2015 (cit. alle pp. 5, 8, 9, 11, 17).
- [3] A.H. Landrock. *Adhesive Technology Handbook*. Noyes Publications, 1985. Cap. p 15 (cit. alle pp. 5, 13).
- [4] Stefano Vinto. *Caratteristiche e prestazioni degli adesivi per le giunzioni meccaniche*. URL: <https://www.ilprogettistaindustriale.it/caratteristiche-e-prestazioni-degli-adesivi-per-le-giunzioni-meccaniche/> (cit. alle pp. 5, 6).
- [5] «Giunzioni di materiali compositi». In: cap. 15 (cit. a p. 6).
- [6] Carlo Calabrese Alberto Pujia. «Adesione». In: *Attualità odontostomatologiche* 2 (2008), pp. 5–10. URL: <https://art.torvergata.it/retrieve/handle/2108/103167/206762/Adesione.pdf> (cit. a p. 9).
- [7] European Aluminium Association. *Materiali didattici incollaggio adesivi*. 2006 (cit. alle pp. 11, 17).
- [8] Treccani. *Adesivi*. URL: <https://www.treccani.it/enciclopedia/adesivi/> (cit. a p. 11).
- [9] Fiorenza Di Sciullo. *Corso incollaggio*. 2016 (cit. a p. 11).
- [10] Pierluigi Cirillo. *Modellazione analitica di giunzioni incollate in materiale composito*. 2016 (cit. a p. 11).
- [11] Robert Sikora. *Fundamentals of metal-metal adhesive joint design*. WSCHÓD Agencja Usługowa, 2006 (cit. a p. 12).
- [12] ASM International Half F. Brinson. *Engineered materials handbook*. 1990. Cap. volume 3: Adhesives and Sealants (cit. alle pp. 14, 28).

- [13] R.Ciardello G.Belingardi V.Brunella B.Martorana. *Thermoplastic adhesive for automotive applications*. InTech, 2016 (cit. a p. 17).
- [14] TWI Ltd. *What is a rivet and how do they work? - Definition and meaning*. URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-riveting> (cit. alle pp. 18, 21).
- [15] Peter R.N. Childs. «Fastening and power screws». In: *Mechanical Design Engineering Handbook (Second Edition)* (2019), pp. 773–832 (cit. a p. 18).
- [16] Luigi Mascolo. *Elementi di unione e collegamenti*. URL: https://www.itfalco.edu.it/files/CETF05000Q/Elementi-di-unione-e-collegamenti-parte-1_.pdf (cit. alle pp. 19, 20).
- [17] Henry's Automotive Warehouse. *Automotive rivets explained*. URL: <https://henrysautowarehouse.com/automotive-rivets-explained/> (cit. a p. 21).
- [18] et al. G. Barbieri F. Cognini. *Tecniche di efficientamento dei processi di saldatura industriale: Settore Automotive*. Report Ricerca di Sistema Elettrico. Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, 2018 (cit. a p. 21).
- [19] Uniroma 1. *Giunzioni chiodate*. URL: http://www.ingaero.uniroma1.it/users/ingaero/joomla/attachments/647_Giunzioni%20chiodate_2.pdf (cit. a p. 21).
- [20] 3M. *Rivet Bonding Techniques for Higher Quality Heavy Duty Truck Repairs*. URL: https://www.3m.com/3M/en_US/collision-repair-us/resources/collision-articles/full-story/?storyid=26853886-a2ac-446b-9eced57222941604 (cit. a p. 22).
- [21] Wonkee Donkee Tools. *What are the parts of a blind rivet?* URL: <https://www.wonkeedonkeetools.co.uk/rivets/what-are-the-parts-of-a-blind-rivet> (cit. a p. 23).
- [22] TWI Ltd. *What is a pop rivet and how do they work?* URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/pop-rivet> (cit. a p. 23).
- [23] Mitch Becker. *Aluminum Series: Rivet Bonding*. URL: <https://www.bodyshopbusiness.com/aluminum-series-rivet-bonding/> (cit. alle pp. 25, 26).
- [24] Pironi A. Moroni F. «Technology of Rivet: Adhesive Joints». In: *Hybrid Adhesive Joints* (2010), pp. 79–108 (cit. a p. 25).
- [25] Hoffer K. «Rivet Joints in Aluminium Structural Components I and II». In: *Aluminium* (1983), pp. 473–477 (cit. a p. 25).
- [26] Smart J. Fung C.P. «An Experimental and Numerical Analysis of Riveted Single Lap Joints». In: *IMEchE* (1994), pp. 78–90 (cit. a p. 25).

- [27] Ali M.Al-Samhan. «Analysis of Adhesively Bonded Riveted Joints». In: *Journal of King Saud University - Engineering Sciences* 18 (2005), pp. 57–65. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1018363918308213#bib0080> (cit. a p. 26).
- [28] E. Zarzeka-Raczkowska Tomasz Sadowski. «Hybrid Adhesive Bonded and Riveted Joints – Influence of Rivet Geometrical Layout on Strength of Joints». In: *Archives of Metallurgy and Materials* (2012), pp. 1127–1135 (cit. a p. 26).
- [29] TWI Ltd. *What is riv-bonding?* URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-riv-bonding> (cit. a p. 26).
- [30] TWI Ltd. *What is hybrid-joining?* URL: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-hybrid-joining> (cit. a p. 26).
- [31] RedazioneMU. *Automobilistici ma non solo: gli acciai AHSS*. URL: meccanicanews.com/2020/11/18/automobilistici-ma-non-solo-gli-acciai-ahss/ (cit. a p. 29).
- [32] European Aluminium Association. *Automotive and transport*. URL: <https://www.european-aluminium.eu/about-aluminium/aluminium-in-use/automotive-and-transport/> (cit. a p. 30).
- [33] NebSal. *Nebbia salina*. URL: <https://nebbiasalina.com/prove/nebbia-salina/> (cit. a p. 40).
- [34] Leoni Roberto. *Chimica che non si vede: gli adesivi*. URL: https://dipcia.unica.it/superf/Lauree_Scientifiche/Adesivi.pdf (cit. a p. 40).
- [35] Wikipedia. *Calorimetria differenziale a scansione*. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Calorimetria_differenziale_a_scansione (cit. alle pp. 127, 129).
- [36] Alfatest. *L'Analisi termica differenziale(DTA) e la calorimetria differenziale a scansione(DSC)*. URL: <https://www.alfatest.it/approfondimenti/1-analisi-termica-differenziale-dta-e-la-calorimetria-differenziale-scansione-dsc> (cit. a p. 128).
- [37] Treccani. *Transizione vetrosa*. URL: https://www.treccani.it/enciclopedia/transizione-vetrosa_%28Enciclopedia-della-Scienza-e-della-Tecnica%29/ (cit. a p. 128).